

VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA KYBERNETIKY A BIOMEDICÍNSKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

ZAŘÍZENÍ PRO VYTVÁŘENÍ MALÝCH
MAGNETICKÝCH POLÍ A JEHO ŘÍZENÍ

DEVICE FOR THE CREATION OF SMALL MAGNETIC FIELDS
AND ITS CONTROL

Zadání bakalářské práce

Student:

Jakub Němčík

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612R041 Řídicí a informační systémy

Téma:

Zařízení pro vytváření malých magnetických polí a jeho řízení
Device for the Creation of Small Magnetic Fields and its Control

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s problematikou magnetického pole.
2. Seznámení se s problematikou Helmholtzových cívek.
3. Navržení Helmholtzových cívek a řídicí elektroniky.
4. Realizace navrženého řešení.
5. Experimentální ověření navrženého řešení.
6. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KNOEPFEL, Heinz Enzo. *Magnetic fields: a comprehensive theoretical treatise for practical use*. New York: Wiley, c2000, xxi, 619 s. ISBN 0-471-32205-9.
- [2] MACHÁČ, Jan. *Theory of electromagnetic field*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, 187 s. ISBN 80-01-02664-7.
- [3] RIPKA, Pavel. *Magnetic sensors and magnetometers*. Boston: Artech House, c2001, xviii, 494 s. ISBN 1-58053-057-5.
- [4] BRAUER, John R. *Magnetic actuators and sensors*. [Online-Ausg.]. Piscataway, N.J.: Hoboken, N.J., 2006. ISBN 978-0471777717.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Vala**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě

Datum odevzdání: 29. 4. 2015

Podpis: 

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval své rodině za podporu a trpělivost při studiu. Dále bych rád poděkoval vedoucímu této bakalářské práce Ing. Davidu Valovi za odbornou pomoc a konzultace.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s problematikou vytváření magnetického pole. Na základě těchto znalostí poté musím navrhnout a realizovat zařízení, které slouží k vytváření homogenního magnetického pole o velikosti několika mT pomocí Helmholtzových cívek. Nedílnou součástí je také návrh řízení magnetického pole pro toto zařízení.

Práce zahrnuje teoretický popis problematiky magnetických polí a popis Helmholtzových cívek. Mimo jiné dále obsahuje návrh jednotlivých částí zařízení, jejich rozměry, výpočet velikostí magnetického pole, výpočet rozměrů homogenního pole (v centimetrech) a popis vhodných možností řízení, které také realizuji.

V praktické části je popsána realizace navrženého zařízení, ověření jeho funkčnosti a řízení magnetického pole. Veškeré dosažené výsledky jsou zhodnoceny v závěru.

KLÍČOVÁ SLOVA

magnetické pole; Helmholtzovy cívky; magnetická indukčnost; zdroje magnetických polí; řízení; operační zesilovač; zpětná vazba

ABSTRACT

The goal of this bachelor's work is to become familiar with the issue of creating magnetic field. Based on these information, I have to design and realize device, which is used to creating homogeneous magnetic field with size of few mT by using Helmholtz coil. Control design of magnetic field for the device is also integral part.

The work includes a theoretical description of magnetic field's issue and Helmholtz coils. Among other things it includes design of the individual parts, its and magnetic field's size, calculation of homogenous magnetic field size (in centimetres) and the theoretical description of suitable controlling, which I also realize.

The realization of designed device, verification its function and magnetic field controlling are described in the practical part. All of achieved results are summed up in the conclusion.

KEY WORDS

magnetic field; Helmholtz's coils; magnetic induction; Sources of magnetic fields; control; operational amplifier; feedback

OBSAH

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod.....	11
1 Magnetické pole a jeho zdroje	12
1.1 Dělení magnetického pole	12
1.2 Říditelné zdroje magnetického pole	12
1.2.1 Vodič, kterým protéká proud.....	12
1.2.2 Kruhový závit.....	13
1.2.3 Cívka a solenoid	15
1.2.4 Toroid.....	16
1.2.5 Helmholtzovy cívky	16
2 Konstrukční návrh	18
2.1 Konstrukce	18
2.2 Vinutí.....	21
2.3 Výpočty	22
3 Realizace konstrukce	26
3.1 Realizace okruží	26
3.2 Realizace stojanů.....	28
4 Řízení	29
4.1 Úprava vstupního signálu.....	29
4.1.1 Odečtení 2,5 V ze vstupního napětí.....	30
4.2 regulátor	31
4.3 Koncový zesilovač	34
4.3.1 Jednočinný zesilovač třídy A	34
4.3.2 Dvojčinný zesilovač třídy B	35
4.3.3 Dvojčinný zesilovač třídy AB	35
4.3.4 Zesílení	37
4.4 Napájení	37
4.5 Návrh chladičů	38
4.5.1 Chladič pro koncový zesilovač TDA7294	38
4.5.2 Chladič pro stabilizátory	40

4.6	Testování řízení	41
4.7	DPS	42
5	Závěr	44
	Literatura	45
	Seznam příloh.....	47

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	označení pro prostor, jež je možné popsat třemi rozměry (trojrozměrný)
A_{U+} , A_{U-}	invertující a neinvertující vstup do operačního zesilovače
B	magnetická indukčnost, jednotka Tesla (T)
C	kapacita, jednotka Farad (F)
DPS	deska plošného spoje
E	přenos regulační odchylky
G_R	přenos soustavy
I	proud, jednotka ampér (A)
K	zesílení
l	délka, jednotka metr (m)
N	počet závitů
OZ	operační zesilovač
P	výkon, jednotka watt (W)
P	proporcionální regulátor
PD	proporcionálně derivační regulátor
PI	proporcionálně integrační regulátor
PID	proporcionálně integračně derivační regulátor
r, R	poloměr, jednotka metr (m)
R	odpor, jednotka ohm (Ω)
R_{TH}	tepelný odpor, jednotka stupeň celsia na watt ($^{\circ}CW^{-1}$)
T	teplota, jednotka stupeň celsia ($^{\circ}C$)
U	napětí, jednotka volt (V)
U	přenos akční veličiny
X, Y, Z	značení os kartézského souřadnicového systému
μ_0	permeabilita vakua, jednotka $T \cdot m/A$
φ	úhel, jednotka stupeň ($^{\circ}$)
ρ_{CU}	měrný odpor mědi, jednotka $\Omega \cdot m$
τ	časová konstanta

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Magnetická indukčnost dB v bodě P dle Boit-Savartova zákona uplatněná pro vodič, jímž protéká proud [2].....	12
Obrázek 2 - Ukázka použití pravidla pravé ruky [4].....	13
Obrázek 3 - Kruhový závit, jímž protéká proud a uplatnění Boit-Savartova zákona [2].....	13
Obrázek 4 - Solenoid - dlouhá cívka [4]	15
Obrázek 5 – Toroid [2].....	16
Obrázek 6 - Helmholtzovy cívky [2].....	16
Obrázek 7 - Magnetické indukční čáry Helmholtzových cívek	17
Obrázek 8 – náskres největšího okruží	18
Obrázek 9 - náskres rozložení cívek	19
Obrázek 10 - náskres držáku pro největší okruží	19
Obrázek 11 - náskres držáku pro střední okruží	20
Obrázek 12 - náskres stojanu pro nejmenší cívky	20
Obrázek 13 - 3D návrh v programu Inventor Pro společnosti Autodesk	21
Obrázek 14 - Graf závislosti magnetické indukce, kdy a je rovno poloměru	24
Obrázek 15 - Graf závislosti magnetické indukce, kdy a je menší než poloměr.....	24
Obrázek 16 - Graf závislosti magnetické indukce, kdy a je větší než poloměr.....	25
Obrázek 17 - Výkres pro vytvoření G-kódu v programu Inventor.....	26
Obrázek 18 - Zhotovené okruží.....	27
Obrázek 19 - Zpevnění okruží.....	27
Obrázek 20 - Stojan pro střední okruží – úprava pro frézování	28
Obrázek 21 - Stojan pro největší okruží - úprava pro frézování	28
Obrázek 22 - blokové schéma řízení	29
Obrázek 23 - Úprava vstupního signálu pomocí rozdílového zesilovače	30
Obrázek 24 - Blok Úprava vstupního signálu	31
Obrázek 25 - PI regulátor vytvořený pomocí OZ [8]	33
Obrázek 26 - PI regulátor	34
Obrázek 27 - Koncový zesilovač TDA9294	35
Obrázek 28 - Zobrazení pinů koncového zesilovače.....	36
Obrázek 29 - Schéma zapojení TDA7294V	36
Obrázek 30 - Napájení operačních zesilovačů	38
Obrázek 31 - chladič pro stabilizátory	40
Obrázek 32 - Chladič pro koncové zesilovače	41
Obrázek 33 - <i>Zapojení na nepájivém poli pro testování řízení</i>	42
Obrázek 34 - DPS před zesilovací částí	42
Obrázek 35 - DPS koncového zesilovače.....	43

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Poloměry jednotlivých okruží.....	21
Tabulka 2 - Výpočty pro jednotlivé Helmholtzovy cívky.....	23
Tabulka 3 - Tabulka upraveného rozsahu	29
Tabulka 4 - Zesílení pro jednotlivé cívky	37
Tabulka 5 - Parametry stabilizátorů	37
Tabulka 6 - Výkony a příkony pro jednotlivé cívky	39
Tabulka 7 - Tepelné odpory a teplotní spády	39
Tabulka 8 - parametry stabilizátorů	40

ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá problematikou magnetického pole a jeho vytváření. Na základě získaných znalostí v této oblasti se mimo jiné zabývá i návrhem zařízení, které bude vytvářet malé magnetické pole. Při první konzultaci mi Ing. David Vala, vedoucí mé bakalářské práce, sdělil základní představu tohoto zařízení, požadavky na něj a na celou bakalářskou práci kladené.

V první části, teoretickém úvodu, popisují, co to magnetické pole je a jaké jsou možné způsoby vytváření magnetických polí, které se dají řídit. Mimo popisované zdroje, zde totiž patří i permanentní magnety či země jako zdroj magnetického pole. Tyto zdroje však nelze řídit, proto jsem je z teoretického úvodu vypustil.

Další částí je návrh již zmíněného zařízení pro vytváření magnetických polí na základě teoretických znalostí. Hlavním účelem, neboli hlavním požadavkem, tohoto zařízení je vytváření homogenního magnetického pole ve třech osách X, Y, Z, s magnetickou indukčností jednoho mT (militesla – odvozená jednotka magnetické indukčnosti) pokud možno za použití tří párů Helmholtzových cívek. Aby bylo možné ověřit velikost magnetické indukčnosti pomocí senzoru, tak průměry největší cívky by měly být v rozsahu 30–40 cm a nejmenší 20–30 cm. Tyto rozměry souvisí samozřejmě i s magnetickým polem, protože vzdálenost mezi cívkami musí být rovna poloměru cívek, viz níže, tak aby byly rozměry homogenního magnetického pole co největší. Nedílnou součástí je i realizace takto navržené kostry, kvůli které jsem musel upravit návrh. Vybral jsem nejvíce vyhovující materiál a popsal celý proces výroby.

Jelikož se jedná o zařízení určené pro studijní účely, musí být magnetické pole vhodně řízeno, proto se v další části zabírám návrhem a realizací řízení. Podrobně popisují jednotlivé bloky řízení, důvod proč jsem jej vybral a jak jsem jej zpracoval. Pro celý návrh řízení jsou důležité výpočty. Ty v této části samozřejmě nechybí. Následně jsem si navržené řízení otestoval a vypracoval desky plošných spojů, na které jsem jednotlivé prvky a součástky napájel.

A nakonec v závěru zhodnocuji celou práci a dosažené výsledky.

1 MAGNETICKÉ POLE A JEHO ZDROJE

První zmínky o magnetických a elektrických jevech se objevily již v roce 600 před našim letopočtem ve starověkém Řecku. Elektřina i magnetismus byly sledovány po celá staletí odděleně. V průběhu 19. století se začala studovat vzájemná souvislost mezi oběma jevy a zavedl se pojem elektromagnetismus. Dánský fyzik Hans Christian Oersted v roce 1819 experimentálně objevil, že pomocí vodiče, jímž protéká proud, může vychýlit magnetku. Pár měsíců poté francouzský matematik André Marie Ampère experimentálně i teoreticky vysvětlil tento objev. [1]

Magnetické pole je definováno jako prostor, ve kterém se projevují účinky magnetických sil na zmagetované těleso, vodiče elektrického proudu či pohybující se nosiče elektrického náboje. Velikostí, neboli jinak také mírou magnetického pole, je vektorová veličina zvaná magnetická indukce, která se značí písmenem B a jejíž jednotkou je Tesla (T).

1.1 DĚLENÍ MAGNETICKÉHO POLE

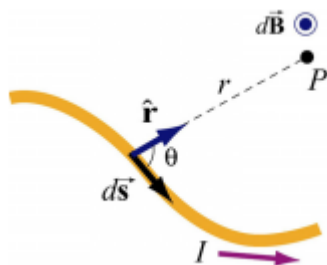
Magnetické pole se dělí podle závislosti na čase nebo prostorového rozložení magnetické indukce. Dělení je tedy následující:

- Podle rozložení magnetických sil
 - stejnorodé (homogenní) – magnetická indukce má ve všech bodech tohoto pole stejný směr i velikost
 - různorodé – magnetická indukce má různý směr i různou velikost v jednotlivých bodech
- Podle závislosti na čase
 - stacionární – časově neměnné magnetické pole
 - nestacionární – časově proměnné magnetické pole

1.2 ŘÍDITELNÉ ZDROJE MAGNETICKÉHO POLE

1.2.1 VODIČ, KTERÝM PROTÉKÁ PROUD

Podle Boit-Savartova zákona pro jakýkoliv bod A , nacházející se v blízkosti vodiče, jímž se pohybuje náboj, tím pádem i protéká proud, můžeme spočítat změnu indukčnost magnetického pole $d\vec{B}$ z malého segmentu drátu $d\vec{s}$ (obrázek 1). Z obrázku je také patrné, že r je vzdálenost mezi vodičem a magnetickým polem v bodě P a \hat{r} je její jednotkový vektor. [2]



Obrázek 1 - Magnetická indukčnost dB v bodě P dle Boit-Savartova zákona uplatněná pro vodič, jímž protéká proud [2]

Pokud budeme brát v potaz, že segmenty $d\vec{s}$ jsou vektory, které nacházejí na celém rozsahu vodiče a v daném místě mají stejný směr jako směr proudu, pak nekonečně malý zdroj proudu, pro jednotlivý

segment, můžeme zapsat jako $I \cdot d\vec{s}$. Celé vyjádření tedy podle Boit-Savartova zákona pro změnu magnetického pole $d\vec{B}$ je:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} \quad (1.1.1)$$

kde

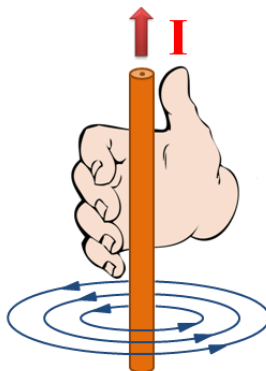
\times je označení pro vektorový součin,

μ_0 značí konstantu permeability vakua ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$).

[2]

Tento zdroj magnetického pole je nestacionární, jelikož je závislá na dodávaném proudu, a také nehomogenní, protože v závislosti na tvaru vodiče závisí i směr magnetické indukčnosti. Pouze v případě trvalého dodávání stejného proudu i absolutní přímosti vodiče můžeme říci, že vytváří homogenní a stacionární magnetické pole.

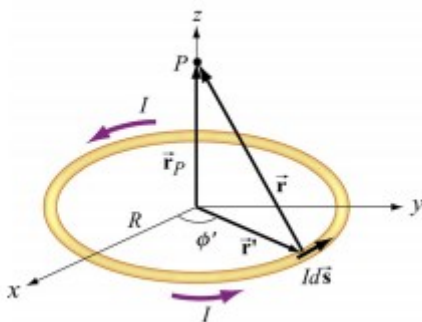
Pro zjednodušenou představu o směru magnetický indukčních čar se používá pravidlo pravé ruky. Toto pravidlo říká, že prsty ukazují směr magnetických indukčních čar a vychýlený palec směr proudu (obrázek 2).



Obrázek 2 - Ukázka použití pravidla pravé ruky [4]

1.2.2 KRUHOVÝ ZÁVIT

Obdobně jako u vodiče, kterým protéká proud, tak i u kruhového závitu platí Boit-Savartův zákon. Kruhový zavit si můžeme představit jako jeden zavit cívky, jímž protéká proud (obrázek 3).



Obrázek 3 - Kruhový zavit, jímž protéká proud a uplatnění Boit-Savartova zákona [2]

[2]

Pro výpočet magnetické indukčnosti \vec{B} v bodě P si musíme vyjádřit nejdřív pomocí Kartézských souřadnic vektory \vec{r} , \vec{r}' a \vec{r}_p :

$$\vec{r}_p = z \cdot \hat{z} \quad (1.2.1)$$

$$\vec{r} = \vec{r}_p - \vec{r}' \quad (1.2.2)$$

$$\vec{r}' = R \cdot (\hat{x} \cdot \cos\varphi' + \hat{y} \cdot \sin\varphi') \quad (1.2.3)$$

kde

z je z-ová souřadnice,

$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ jsou jednotkové vektory složek x, y a z .

Následně pak pro element $I \cdot d\vec{s}$ v \vec{r}' platí:

$$I \cdot d\vec{s} = I \cdot \left(\frac{d\vec{r}'}{d\varphi'} \right) d\varphi' = I \cdot R \cdot (-\hat{x} \cdot \sin\varphi' + \hat{y} \cdot \cos\varphi') \cdot d\varphi' \quad (1.2.4)$$

Velikost směrového vektoru \vec{r} , lze spočítat pomocí Pythagorovy věty:

$$r = |\vec{r}| = \sqrt{|\vec{r}_p|^2 + |\vec{r}'|^2} = \sqrt{z^2 + R^2} \quad (1.2.5)$$

pro jehož jednotkový vektor \hat{r} platí:

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r} = \frac{\vec{r}_p - \vec{r}'}{\sqrt{z^2 + R^2}}. \quad (1.2.5)$$

Změna magnetického pole $d\vec{B}$ je teda definovaná u kruhového závitu pro bod P, který leží na z-ové ose podle vztahu 2.2.6:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{s} \times (\vec{r}_p - \vec{r}')}{(z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (1.2.6)$$

Úpravou vektorového součinu $d\vec{s} \times (\vec{r}_p - \vec{r}')$ nám vyjde:

$$\begin{aligned} d\vec{s} \times (\vec{r}_p - \vec{r}') &= (R \cdot (-\hat{x} \cdot \sin\varphi' + \hat{y} \cdot \cos\varphi') \cdot d\varphi') \times (z \cdot \hat{z} - R \cdot (\hat{x} \cdot \cos\varphi' + \hat{y} \cdot \sin\varphi')) = \\ &= R \cdot d\varphi' \cdot (-\hat{x} \cdot \sin\varphi' + \hat{y} \cdot \cos\varphi') \times (-R \cdot \hat{x} \cdot \cos\varphi' - R \cdot \hat{y} \cdot \sin\varphi' + z \cdot \hat{z}) = \\ &= R \cdot d\varphi' \cdot (z \cdot \hat{x} \cdot \cos\varphi' + R \cdot \hat{z} \cdot \sin^2\varphi' + R \cdot \hat{z} \cdot \cos^2\varphi' + z \cdot \hat{y} \cdot \sin\varphi') = \\ &= R \cdot d\varphi' \cdot (z \cdot \hat{x} \cdot \cos\varphi' + z \cdot \hat{y} \cdot \sin\varphi' + R \cdot \hat{z}), \end{aligned}$$

a nyní zpětně dosadíme do vztahu 2.2.6 a vyjde nám:

$$d\vec{B} = \frac{I \cdot d\vec{s} \times (\vec{r}_p - \vec{r}')}{(z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{(z \cdot \hat{x} \cdot \cos\varphi' + z \cdot \hat{y} \cdot \sin\varphi' + R \cdot \hat{z})}{(z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} d\varphi'.$$

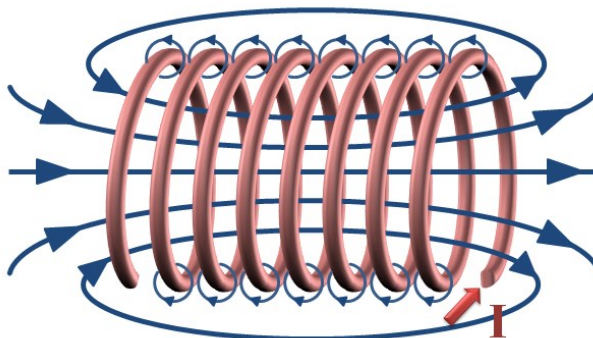
Jelikož chceme, ale dostat magnetickou indukčnost B ve směru osy z (x a y jsou nulové), pak integrací dostaneme:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R}{4 \cdot \pi \cdot (z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \int_0^{2\pi} d\varphi' = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot (z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1.2.7)$$

Jako u vodiče i kruhový závit má nehomogenní a nestacionární pole. [2]

1.2.3 CÍVKA A SOLENOID

Cívka jako zdroj magnetického pole se dá rozdělit do dvou kategorií. Jednou z nich je tenká cívka, jejíž magnetické pole je stejné jako magnetické pole N závitů, kde právě N udává množství závitů. Druhým případem je solenoid (obrázek 4), jinak řečeno dlouhá cívka, která je tvořena velkým množstvím kruhových závitů.



Obrázek 4 - Solenoid - dlouhá cívka *Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.*

V případě ideálního solenoidu (nekonečně dlouhý) můžeme říct, že uvnitř něj je vytvářeno homogenní magnetické pole. Pro výpočet magnetické indukčnosti solenoidu se používá Ampérův zákon (vztah 1.3.1):

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \cdot l = \mu_0 \cdot I_{ec} \quad (1.3.1)$$

kde

$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ je označení křivkového integrálu, který má tvar kruhového průřezu solenoidu, s orientací směru toku proudu,

l je délka solenoidu [m],

I_{ec} celkový proud uzavřený ve smyčce, který je roven součinu celkových počtů závitů N a proudu I [A].

Po úpravě tedy dostaneme:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{l} \quad (1.3.2)$$

[2]

1.2.4 TOROID

Toroid je do kruhu stočená cívka (obrázek 5), která má N závitů. Výpočet magnetického pole je obdobný jako u solenoidu, a to:

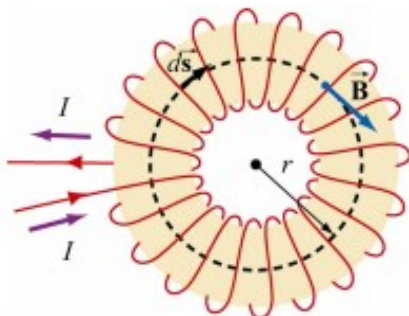
$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (1.4.1)$$

kde

l je nahrazeno $2 \cdot \pi \cdot r$ [m].

Na rozdíl od solenoidu toroid nevytváří homogenní magnetické pole uvnitř něj, ale pole, jehož magnetická indukce klesá s $\frac{1}{r}$.

[2]

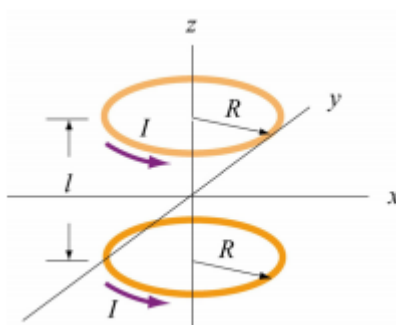


Obrázek 5 – Toroid [2]

1.2.5 HELMHOLTZOVY CÍVKY

Dalším zdrojem magnetického pole jsou Helmholtzovy cívky (obrázek 6) pojmenované podle německým lékařem a matematikem Hermann von Helmholtz. Jedná se o dvě cívky, které mají jak stejný poloměr R , tak i stejný počet závitů N . Jelikož jsou navzájem propojené (sériově zapojené jedna za druhou), tak oběma cívkami protéká proud I . Tyto cívky jsou umístěny vedle sebe ve vzdálenosti l , která je stejně velká jako poloměr R .

[3]



Obrázek 6 - Helmholtzovy cívky **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Celková magnetická indukčnost je rovna součtu indukčností jednotlivých cívek (vztah 1.5.1):

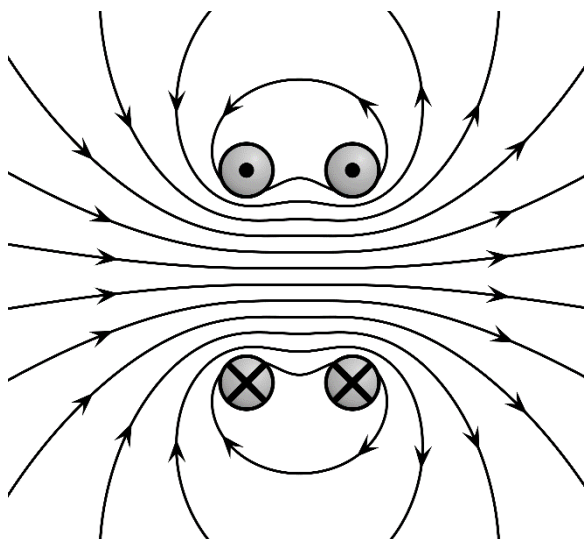
$$B = B_1 + B_2 \quad (1.5.1)$$

jelikož tyto cívky jsou zcela stejné a stejně vzdálené od 0 hodnoty na ose z, jinak řečeno $z = 0$, a to o hodnotu $\frac{l}{2} = \frac{R}{2}$, tak můžeme napsat:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot ((z - \frac{R}{2})^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot ((z + \frac{R}{2})^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot R^2}{(\frac{5}{4})^{\frac{3}{2}} \cdot R^3} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot R^2}{(\frac{5}{4})^{\frac{3}{2}} \cdot R^3} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{(\frac{5}{4})^{\frac{3}{2}} \cdot R} \quad (1.5.2)$$

[3]

Směry magnetických indukčních čar Helmholtzových cívek lze vidět na obrázku 7. Je z něj patrné, že pole uvnitř cívek je téměř homogenní, neboť magnetická indukčnost má stejný směr i velikost. Platí to pouze ale pro určitou vzdálenost od středu mezi cívkami. S rostoucí vzdáleností od středu klesá velikost a mění se také směr.



Obrázek 7 - Magnetické indukční čáry Helmholtzových cívek

Z hlediska homogenity a indukčnosti magnetického pole je lepší využití solenoidu. Solenoid vytváří silnější a více stejnorodé magnetické pole. Avšak jednoznačnou výhodou Helmholtzových cívek oproti solenoidu je možnost vložení dalšího menšího páru cívek, jelikož je prostorově šetrnější a pro návrh jednodušší.

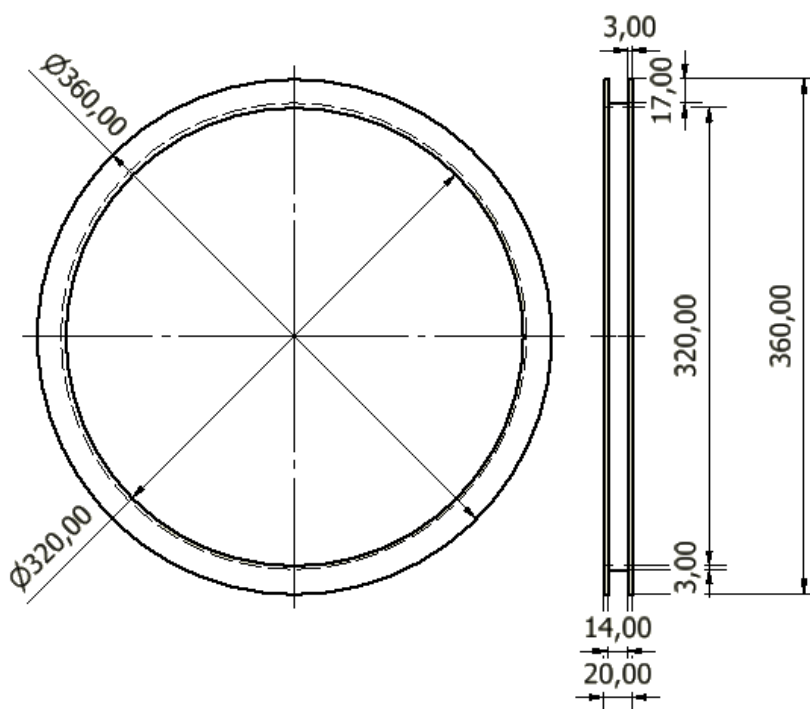
2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH

Na základě teoretického rozboru jsem navrhl zařízení, které vytváří pole pomocí výše zmíněných Helmholtzových cívek. Jelikož zařízení má generovat magnetické pole ve třech osách (X, Y a Z), tak kostra zařízení bude tvořena třemi páry těchto cívek. Celková konstrukce musí být dostatečně velká, na to, aby se do něj dalo vložit měřicí zařízení či senzor, kterým bych ověřil správnou funkčnost či znázornil směr magnetického pole (například kompas, senzor magnetického pole, mobilní telefon s vhodnou aplikací).

2.1 KONSTRUKCE

Prvním krokem, před samotnými výpočty, bylo rozkreslení, jak budou jednotlivé cívky uspořádány a jaké budou mít rozměry, neboť důležitým parametrem pro výpočet magnetické indukce je poloměr cívek (viz teoretický rozbor).

Rozměry největšího okruží, jinak řečeno jednu cívku ze dvojice Helmholtzových cívek, jsem zvolil 360 mm pro vnější průměr, 320 mm pro vnitřní průměr a 20 pro šířku (obrázek 8). Jelikož vinutí bude skryté uvnitř okruží, navrhl jsem zářez o rozměrech 17 mm do hloubky a 14 mm na šířku (obrázek 8). Tím pádem vzniknou tři stěny o tloušťce 3 mm. Důležitý a klíčový je však střední poloměr vinutí neboli vzdálenost středu vinutí ke středu okruží. Tato vzdálenost určuje vzdálenost mezi cívkami a je rovna 171,5 mm v případě největšího okruží.

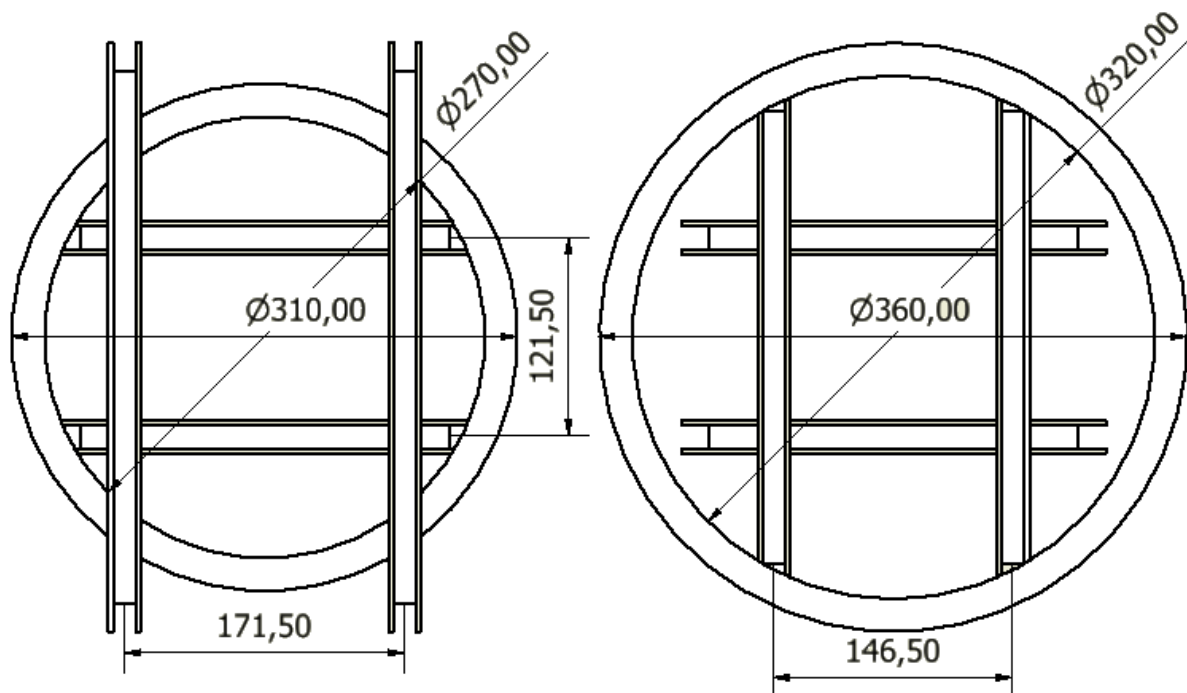


Obrázek 8 – nákres největšího okruží

Střední okruží musí mít menší rozměry, neboť se nachází uvnitř největšího okruží a musí být zachována rovnost vzdálenosti mezi cívkami a středního poloměru samotných okruží. Na základě toho má střední okruží vnější průměr 310 mm, vnitřní průměr 270 mm a tloušťku 20 mm. Rozměry posledního, nejmenšího, okruží jsou na základě předchozích poznatků následující: 260 mm pro vnější průměr,

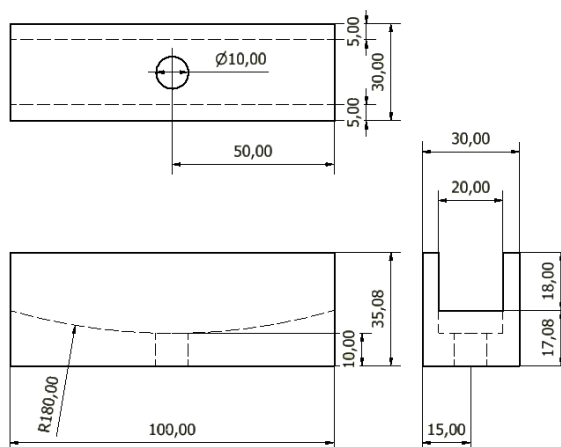
220 pro vnitřní a šířka 20 mm. Tvar výřezu těchto dvou okruží je stejný jako u největšího a to 17 mm do hloubky a 14 mm do šířky. Tím pádem střední poloměr středního okruží je 146,5 mm a nejmenšího okruží je roven 121,5 mm.

Rozložení takto navržených Helmholtzových cívek závisí na tom, která cívka bude generovat magnetické pole ve směru osy X, Y a Z. Na obrázku 9 lze vidět rozložení třech Helmholtzových cívek s dodržением vzdáleností mezi nimi.

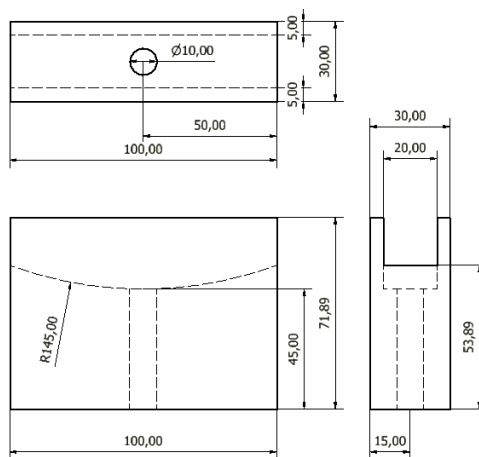


Obrázek 9 - nákres rozložení cívek

Do návrhu konstrukce jsem započítal i návrh stojanů pro jednotlivé cívky, protože musí být umístěny k nějaké ploše. Stabilita je velmi důležitá, neboť celé zařízení se nesmí tzv. „rozsypat“. Cívky budou připevněny k desce pomocí držáků. Jelikož největší a střední okruží slouží pro vytváření magnetického pole ve směru os X a Y, stačí použít jednoduché uchycení pomocí součástek na obrázku 10 a 11. Rozměry jsou dány rozměry okruží, hlavně zakřivení a tloušťka výřezu. Kruhový otvor s průměrem 10 mm slouží k vyvedení vodiče.

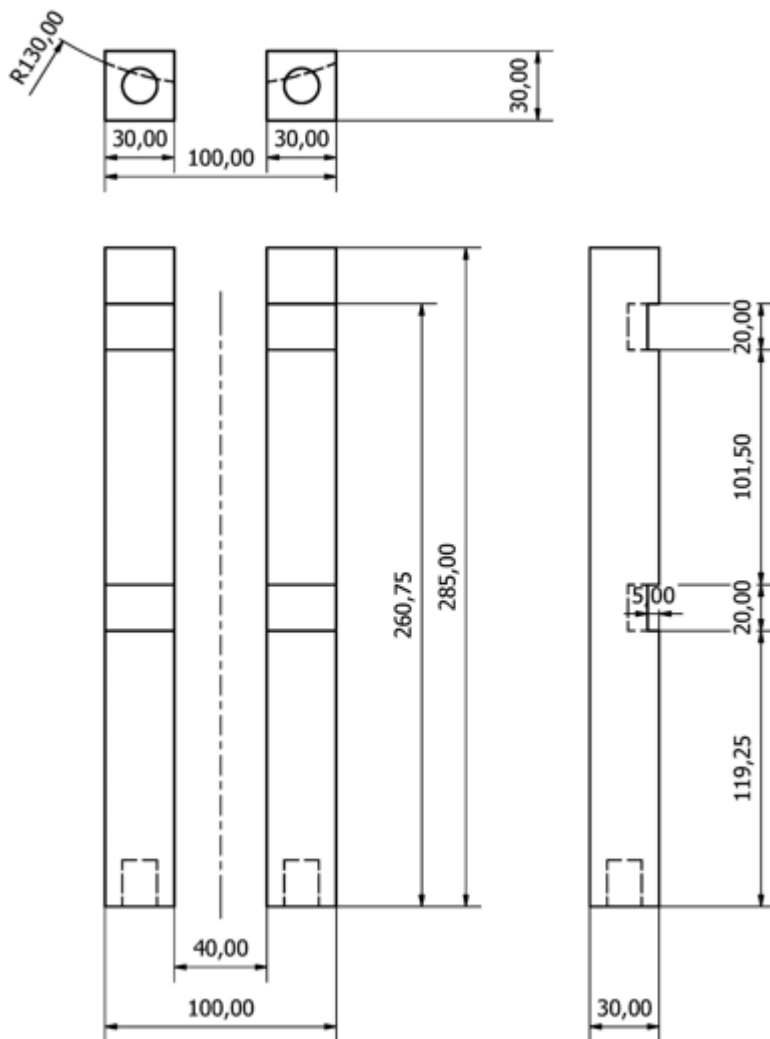


Obrázek 10 - nákres držáku pro největší okruží



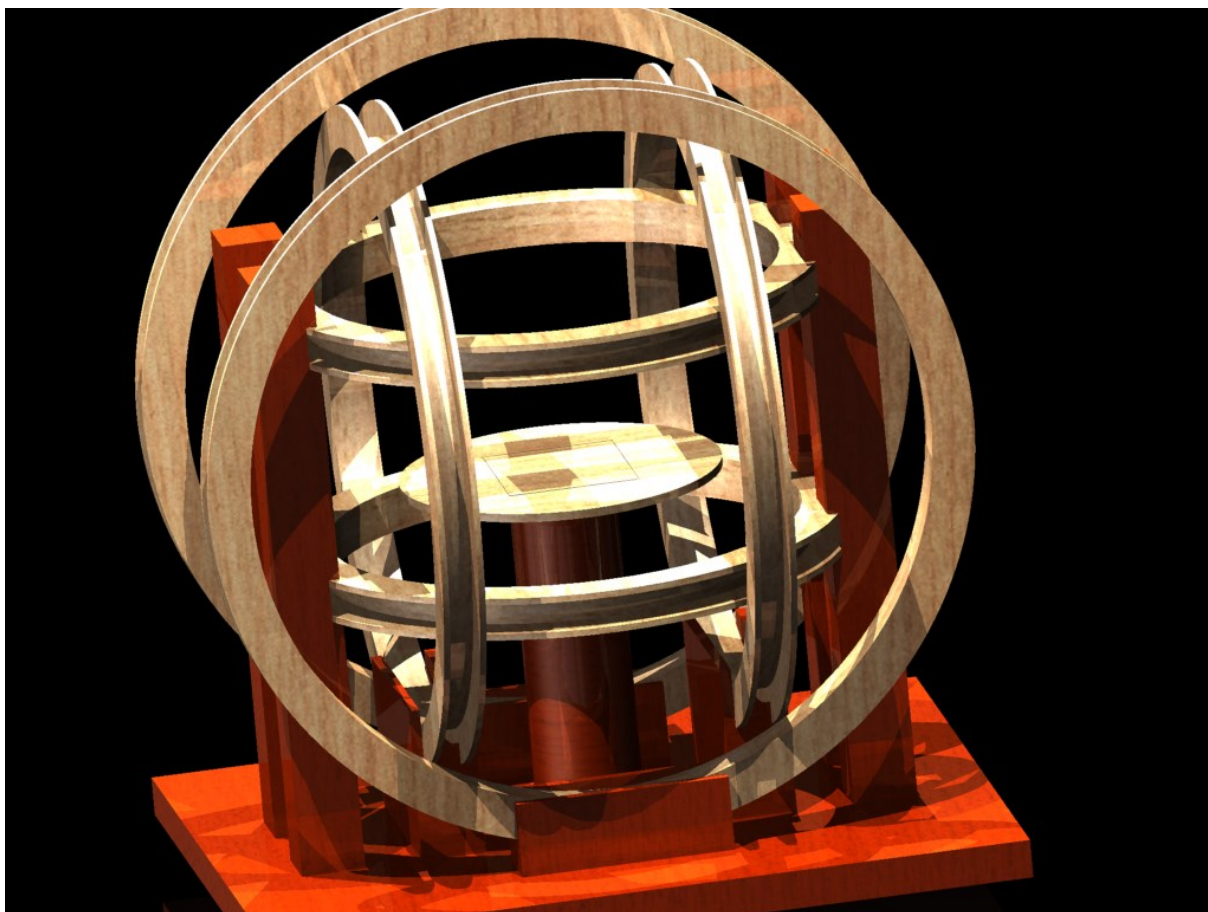
Obrázek 11 - náčrtek držáku pro střední okruží

Oproti těmto držákům, je poslední trochu jiný. Nejmenší okruží slouží pro generování pole ve směru osy Z, proto jsem vytvořil podélný stojan, který má výřezy pro cívky a jehož rozměry jsou vyobrazeny na obrázku 12.



Obrázek 12 - náčrtek stojanu pro nejmenší cívky

Veškeré výkresy, 3D modely a sestavy byli vyhotoveny v programu Inventor firmy Autodesk. Finální podoba konstrukčního návrhu je znázorněna na obrázku 13, i s jednotlivými držáky. Materiál, ze kterého budu vyrábět jednotlivé díly, musí být magneticky neutrální, nesmí ani izolovat ani zesilovat magnetické pole. Na výběr jsem volil ze dvou snadno dostupných materiálů. Jedním z nich je plast, ze kterého by mohla být konstrukce vytisknuta na 3D tiskárně. Avšak 3D tiskárna v těchto rozměrech neumí tisknout, proto se spíše přikláním k překližce. Je snadno dostupná v různých škálách rozměrů a za rozumnou cenu.



Obrázek 13 - 3D návrh v programu Inventor Pro společnosti Autodesk

Tabulka 1 - Poloměry jednotlivých okruží

Cívka	Vnitřní poloměr	Vnější poloměr	Střední průměr
	[mm]	[mm]	[mm]
Největší (pro osu x)	160	180	171,5
Střední (pro osu y)	135	155	146,5
Nejmenší (pro osu z)	110	130	121,5

2.2 VINUTÍ

Vynutí je umístěné uvnitř jednotlivých okruží. Jako vodivý drát je pro teoretický návrh vybrán měděný vodič s průměrem $d = 0,5 \text{ mm}$ s měrným odporem $\rho_{Cu} = 1,75 \mu\Omega \cdot \text{cm} = 1,75 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Maximální teoretický počet vynutí pro cívky je dán rozměry vnitřní části okruží, které jsou u všech stejné (17 mm na výšku a 14 mm šířku). Maximální počet je tedy 952 závitů pro jedno okruží.

Zvolený měděný lakovaný vodič, je snadno dostupný v baleních po metrech nebo kilogramech. Z hlediska ceny, je lepší koupit měděný lakovaný vodič po kilogramech. Kvůli tomu musím znát celkovou délku vinutí, abych mohl spočítat, kolik kilogramů měděného lakovaného vodiče je zapotřebí.

2.3 VÝPOČTY

Pro výpočet magnetické indukčnosti využiji, již zmíněný vztah 1.6.1, který je uveden v teoretickém úvodu výše:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{\left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot r} \quad (2.2.1)$$

Požadavek na magnetickou indukčnost, která má být indukována, je takový, aby byla $1 \text{ mT} = 10^{-3} \text{ T}$. Další parametr, který známe, je poloměr r a ten se pro každou cívku liší a je uvedená výše, v části zabývající se konstrukcí.

Dalším důležitým parametrem je počet závitů, podle počtu závitů a průměru vodiče, se totiž odvíjí i celkový odpor vynutí a tím i napětí a proud. Pro snazší výpočet jsem si určil, že počet závitů $N = 800$. Následně jsem si tedy pro výpočet napětí spočítal odpor vinutí pro měděný vodič pomocí vztahu 2.1.2:

$$R = \rho_{cu} \cdot \frac{l}{S} \quad (2.2.2)$$

kde

ρ_{cu} je měrný odpor mědi [$\Omega \cdot m$],

l je celková délka vodiče pro obě cívky [m],

S je průřez vodiče [mm^2].

Průřez vodiče a celková délka pro jeden pár Helmholtzových cívek se s počítají podle následujících vztahů 2.2.3 a 2.2.4:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2.2.3)$$

$$l = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot N \quad (2.2.4)$$

Po dosazení jsem dostal:

$$S = 0,1963 \text{ mm}^2$$

$$l_1 = 1724,106 \text{ m}$$

$$l_2 = 1472,779 \text{ m}$$

$$l_3 = 1221,451 \text{ m}$$

K nim se nesmí zapomenout přičíst pár metrů navíc do rezervy a pro spojení mezi cívkami.

Proud v jednotlivých cívkách spočítáme osamostatněním ze vztahu 2.2.5:

$$I = \frac{\left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot r \cdot B}{B \cdot \mu_0 \cdot N} \quad (2.2.5)$$

s tím že napětí je rovno $U = R \cdot I$ a výkon $P = U \cdot I$. Vypočtené hodnoty vidíme v .

Tabulka 2.

Tabulka 2 - Výpočty pro jednotlivé Helmholtzovy cívky

Cívky	Poloměr	Délka drátu	Odpor vodiče	Proud	Napětí	Výkon
	[mm]	[m]	[Ω]	[A]	[V]	[W]
Největší	171,5	1724,106	153,664	0,2384	36,635	8,734
Střední	146,5	1472,779	131,264	0,2037	26,733	5,444
Nejmenší	121,5	1221,451	108,864	0,1689	18,388	3,106

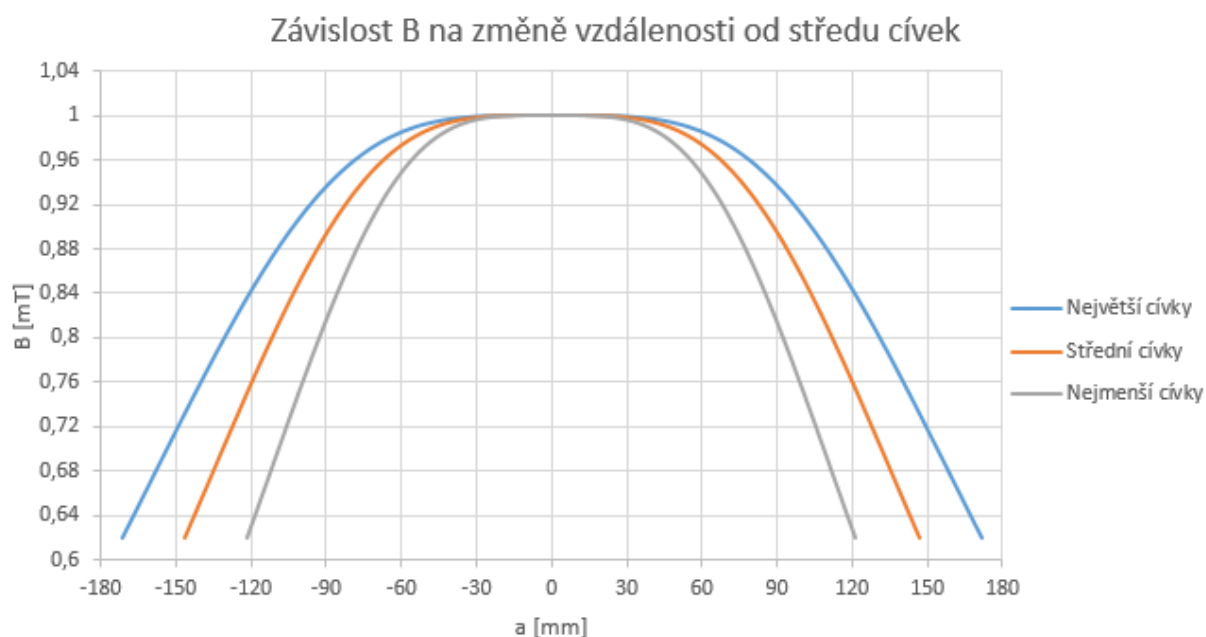
Důležitým parametrem celého zařízení je také znát rozsah, ve kterém je magnetické pole relativně homogenní, neboli v jaké vzdálenosti od středu se magnetická indukčnost téměř nemění či mění s minimální odchylkou. Jelikož každá cívka je napájena stejným proudem tak pak pomocí vztahu:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot r^2}{2 \cdot \left((a - \frac{r}{2})^2 + r^2\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot r^2}{2 \cdot \left((a + \frac{r}{2})^2 + r^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.2.6)$$

kde

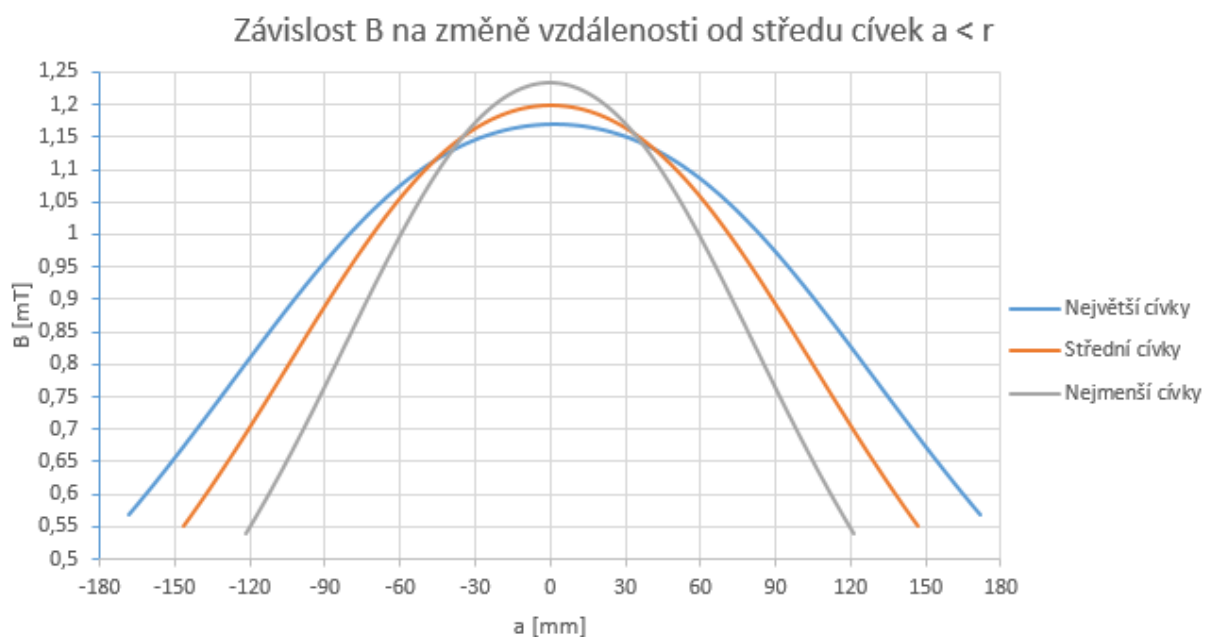
a je vzdálenost od nulového bodu neboli středu mezi cívkami [m]

Na obrázku 14 můžeme vidět závislost magnetické indukčnosti B na vzdálenosti od středu a . Průběhy jednotlivých indukčností se liší, vzhledem k rozdílnosti poloměrů. U největší cívky je magnetické pole relativně homogenní ve vzdálenosti 32,59 mm, u střední to je 27,8 mm a u nejmenší 23,1 mm.



Obrázek 14 - Graf závislosti magnetické indukce, kdy a je rovno poloměru

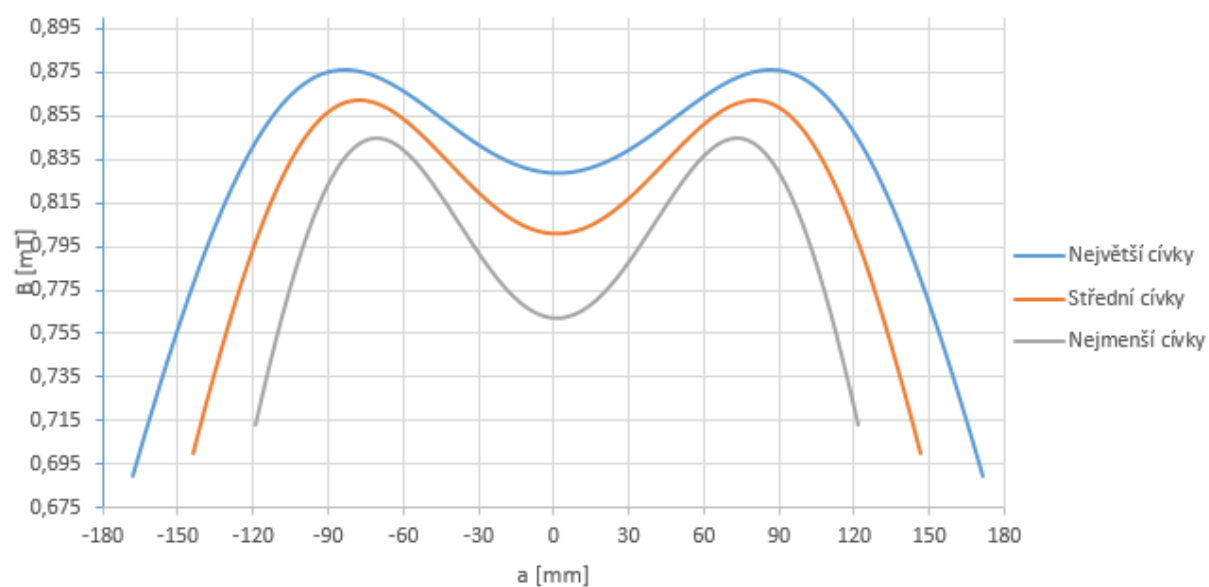
V případě, kdy vzdálenost mezi cívkami bude menší než velikost poloměru, pak vzniká různorodost pole, z čehož vyplývá, že s rostoucí vzdáleností od středu klesá velikost pole (obrázek 15).



Obrázek 15 - Graf závislosti magnetické indukce, kdy a je menší než poloměr

A posledním případem, který může nastat, je zvětšení vzdáleností mezi cívkami na rozměry větší než je poloměr samotných okruží (obrázek 16).

Závislost B na změně vzdálenosti od středu cívek $a > r$

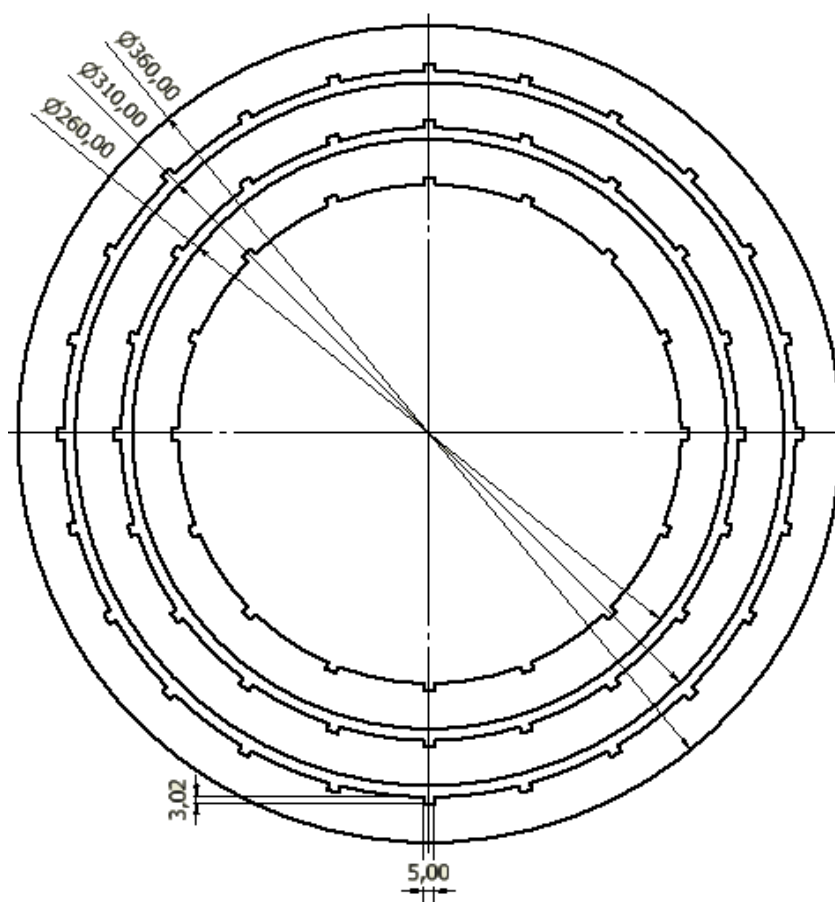


Obrázek 16 - Graf závislosti magnetické indukce, kdy a je větší než poloměr

3 REALIZACE KONSTRUKCE

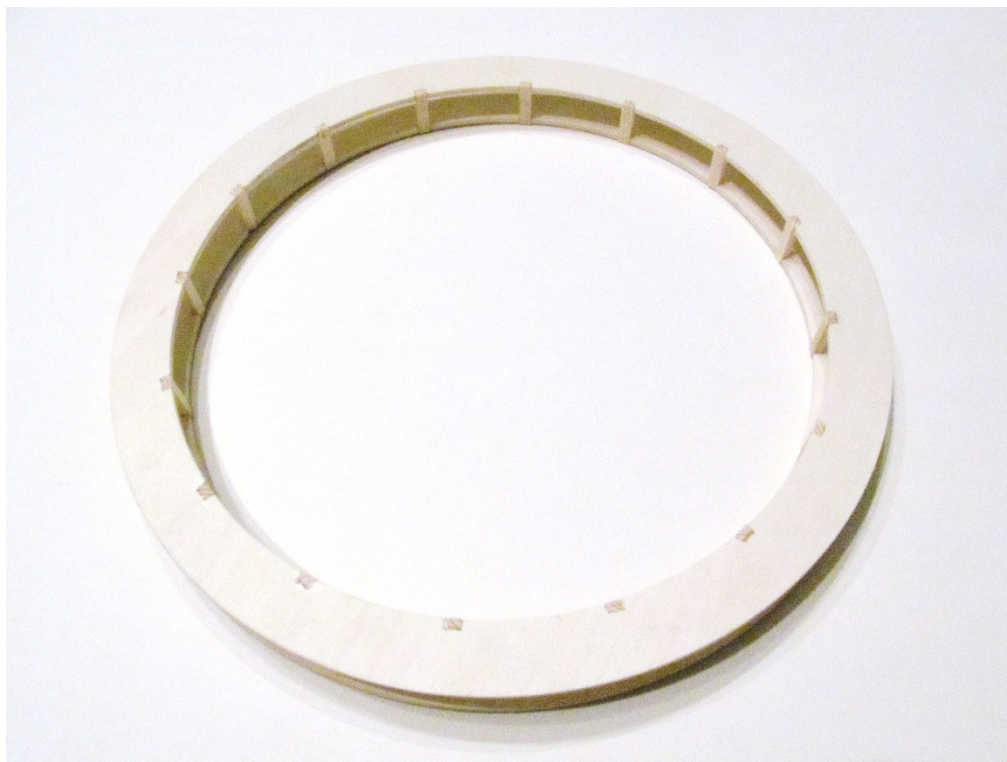
3.1 REALIZACE OKRUŽÍ

Jednotlivá okruží se skládají ze tří stěn, dvou bočních a jedné spojovací. Vyrobení těchto částí jako celků by bylo komplikované. Proto jsem se rozhodl upravit výkresy tak, aby byli snadněji výrobitelné. Spojovací část jsem nahradil nosníky o rozměrech 3x5 mm a délce 2 cm, tak aby byl zachován původní tvar celého okruží. Boční stěny jsem obohatil o zářezy z vnitřní strany. Rozměry těchto zářezů jsou souhlasné s rozměry nosníků. Jelikož jsem potřeboval převést náčrtek do výrobitelné podoby, vložil jsem veškeré boční stěny do jedné plochy v programu Inventor (obrázek 17). Pomocí modulu CAM, který je obsažen v již zmíněném programu Inventor, jsem dále převedl celý výkres do G-kódu. Tento kód se používá pro nastavení pohybu frézky.



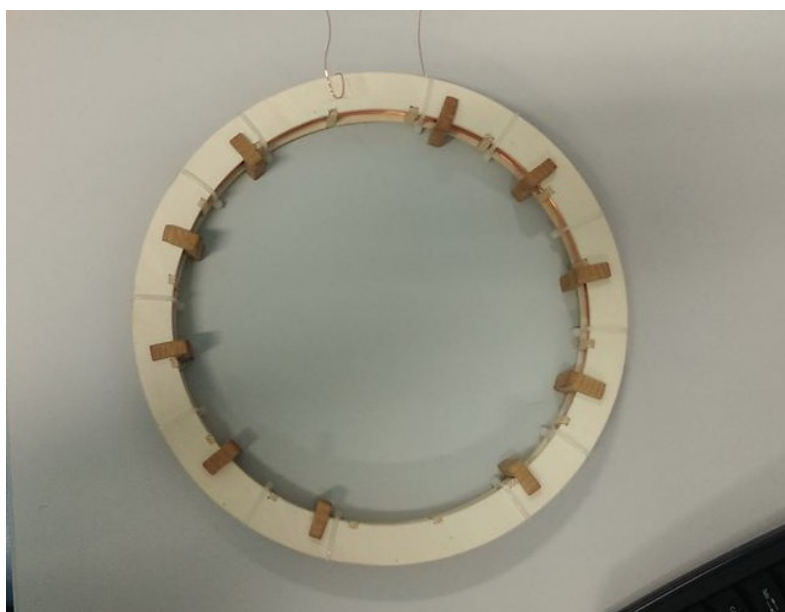
Obrázek 17 - Výkres pro vytvoření G-kódu v programu Inventor

Jako materiál bočních stěn jsme se s mým vedoucím shodli na topolové překližce s tloušťkou 3 mm. Z ní jsem na frézce vyrobil jednotlivá okruží a pomocí smrkových nosníků spojil bez pigmentovým lepidlem (Kanagon), tak aby nebylo ovlivněno generované magnetické pole. Výsledné okruží je zobrazeno na obrázku 18.



Obrázek 18 - Zhotovené okruží

Následně jsem namotal potřebné množství závitů na jednotlivé cívky. Jelikož v blízkosti mého bydliště či školy se nezaobírá namotáváním cívek takových rozměrů žádná firma, musel jsem ručně namotat na každý pár okruží měděný vodič zvlášť. Při namotávání se však objevil problém, kdy se okruží působením rozpínání vodiče začala rozpadat. Proto jsem si vytvořil ze dřeva profil U, tak abych zpevnil okruží (obrázek 19). Po namotání jsem ještě přidal ještě i stahovací pásy.

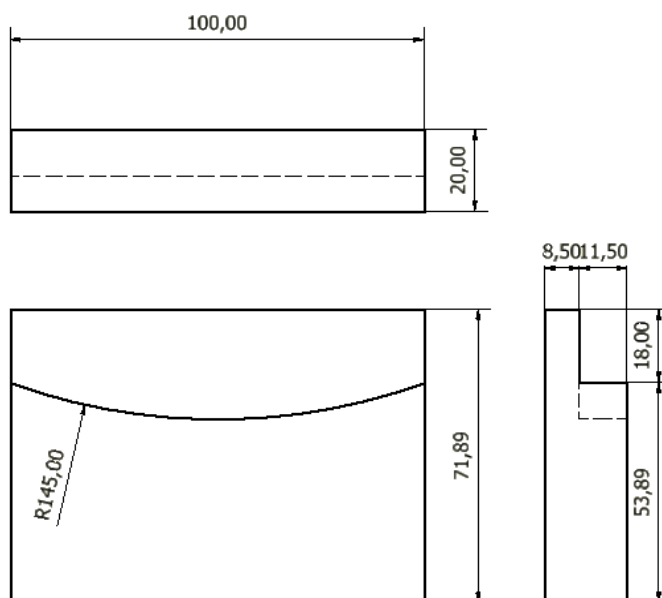


Obrázek 19 - Zpevnění okruží

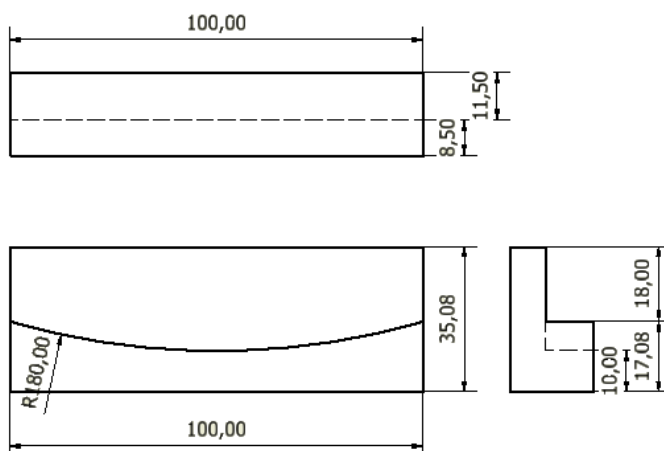
3.2 REALIZACE STOJANŮ

Při namotávání vodiče došlo k zvětšení šířky okruží. Jedná se o velikost 2 až 4 mm. Proto jsem upravil stojany tak, aby se do nich jednotlivá okruží vlezla. Pro frézování jsem musel upravit ještě stojany pro střední a největší okruží (obrázek 20 a 21), tak aby se dalo snadno vyrobit. Rozložil jsem si celý stojan na dvě části, které jsem k sobě přilepil opět pomocí kanagonu. Jako materiál jsem vybral bukové dřevo, které bylo snadno dostupné v mou požadovaných rozměrech. Pro nejmenší okruží jsem zvolil dřevěný hranol, který má rozměry 30x30 mm a dostatečnou délku pro všechny stojany. Musel jsem do nich ovšem vyfrézovat zářezy, v níž budou umístěné okruží. Pomocí modulu CAM jsem si zase vytvořil G - kód.

Bylo velmi důležité tyto stojany umístit do správných vzdáleností od sebe, a vyrobit je pokud možno co nejpřesněji, aby byla zachována potřebná vzdálenost mezi cívkami. Tím jsem zároveň zajistil, aby cívky vytvářeli v co největší ploše homogenní magnetické pole.



Obrázek 20 - Stojan pro střední okruží – úprava pro frézování

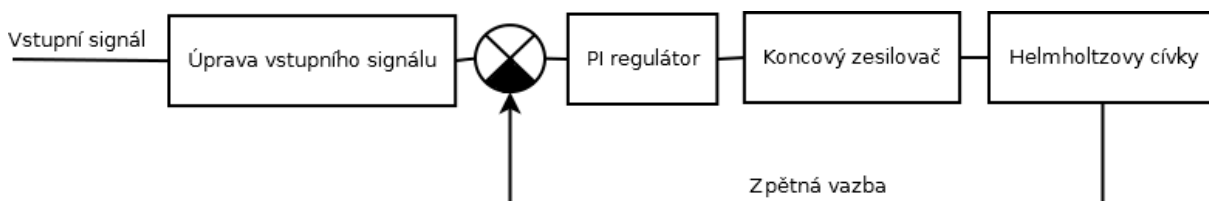


Obrázek 21 - Stojan pro největší okruží - úprava pro frézování

4 ŘÍZENÍ

Abych byl schopný řídit magnetické pole, musím řídit napětí a tím i proud na jednotlivých cívkách. Řídící část je určena totiž vždy pro páry cívek, ne pro celé zařízení. Hlavním důvodem je rozdílnost proudu v závislosti na poloměru cívek. Do každého páru Helmholtzových cívek je nutné přivést tedy rozdílné napětí, neboť chci, aby bylo na každém páru vytvořeno pole s magnetickou indukčností ± 1 mT. Dalším důvodem je, že v případě kdy budu chtít měnit velikosti pole, která povede například ke změně směru střelky magnetu, musí být do každého páru přiveden jiný proud. Potřebuji tedy tři stejné řídicí systémy, které budou regulovány rozdílně, dle požadavku na vstupu. Jinými slovy, musím pro každou cívku docílit rozdílného zesílení.

Blokové schéma navrženého řízení je následující (obrázek 22). Na vstupu přivedu napětí v rozsahu 0 – 5 V. Tento rozsah totiž odpovídá rozsahu standardní měřicí PC karty. Zvolil jsem si jej proto, kdybych chtěl v budoucnu řídit celou soustavu pomocí této karty. Následně signál upravím, odečtu hodnotu ze zpětné vazby a pomocí PI regulátoru zintegruji rozdíl, který přivedu na vstup koncového zesilovače. Výsledný signál je tedy závislý pouze na vstupním signálu.



Obrázek 22 - blokové schéma řízení

4.1 ÚPRAVA VSTUPNÍHO SIGNÁLU

Jak jsem již výše zmínil, vstupní signálem je stejnosměrné napětí v rozsahu 0 – 5 V. Z této hodnoty však nejsem schopen přecházet zároveň do kladných i záporných hodnot. Abych na Helmholtzových cívkách tedy dostal zápornou hodnotu napětí, tím pádem se dostal na hodnotu magnetické indukce -1 mT, musím si rozsah upravit. K tomu slouží blok *Úprava vstupního signálu*. Tento rozsah jsem upravil následovně (viz tabulka 3). V případě když přivedu napětí na vstup v rozsahu 0 až 2,5 V, na výstupu tohoto bloku dostanu záporné napětí -2,5 V až 0 V. Tím pádem na Helmholtzových cívkách bych vytvořil pole s magnetickou indukčností -1 mT až 0 mT. Když bude na vstupu 2,5 V, na výstupu dostanu 0 V, takže zařízení bude generovat pole o velikosti 0 mT. A nakonec, abych dostal na výstupu tohoto bloku kladné napětí, tedy 0 až 2,5 V, musím na vstup přivést 2,5 až 5 V. Což znamená, že indukčnost vytvořeného magnetické pole bude 0 mT až 1 mT.

Tabulka 3 - Tabulka upraveného rozsahu

Vstupní rozsah	Výstupní rozsah	Výsledná magnetická indukčnost
[V]	[V]	[mT]
0 až 2,5	-2,5 až 0	-1 až 0
2,5	0	0
2,5 až 5	0 až 2,5	0 až 1

Nejjednodušší způsob, jak docílit požadovaného rozsahu, je buď přivedení zdroje generujícího i záporné napětí, nebo odečtení 2,5 V pomocí rozdílového zesilovače (obrázek 23). Zesílení pro jednotlivé vstupy se spočítá dle následujících vztahů 4.1.1 a 4.1.2:

$$A_{U+} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (4.1.1)$$

$$A_{U-} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.1.2)$$

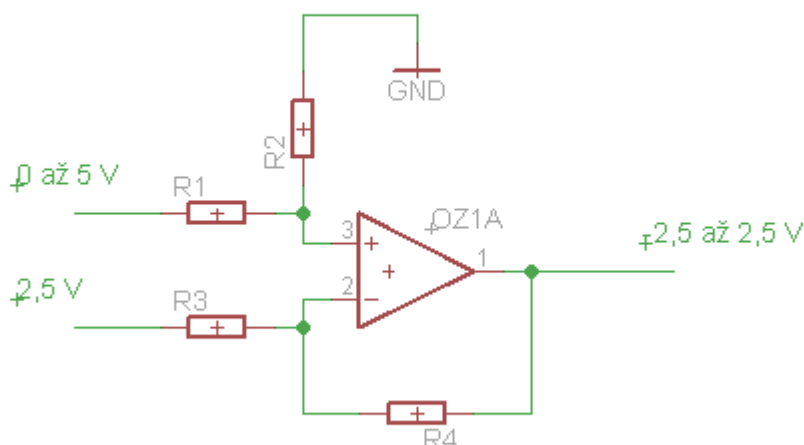
kde platí, že

A_{U+} je zesílení neinvertujícího vstupu,

A_{U-} je zesílení invertujícího vstupu.

Výstupní napětí je tedy rovno součtu napětí na jednotlivých vstupech operační zesilovače (vztah 4.1.3):

$$U_{OUT} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_1 - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_2 \quad (4.1.3)$$



Obrázek 23 - Úprava vstupního signálu pomocí rozdílového zesilovače

[6]

Proto jsem si zvolil hodnoty odporu 1 kΩ tak, aby zesílení bylo rovno 1, neboť nepotřebuji dosáhnout žádného zesílení. O zesílení soustavy se starají až další bloky.

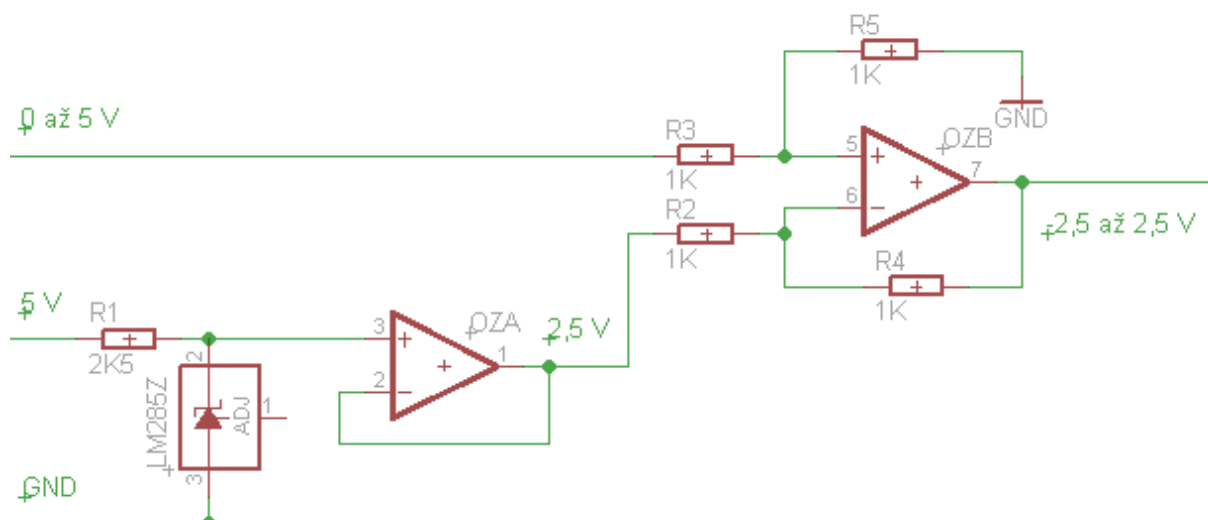
4.1.1 ODEČTENÍ 2,5 V ZE VSTUPNÍHO NAPĚTÍ

Vstupní napětí je dodáváno ze stejnosměrného zdroje. Pro hodnotu 2,5 V jsem použil napěťovou referenci, do níž je přivedeno 5 V přes rezistor 2,5 kΩ. Volba odporu a napětí je dána proudem, který je schopna tato součástka snést. Tato hodnota by dle doporučení výrobce se měla pohybovat v rozsahu od 10 μA do 20 mA. Hodnota proudu součástíou při přivedeném napětí o velikosti 5 V a předřazeného rezistoru s velikostí 2,5 kΩ bude:

$$I_{REF} = \frac{U_{VSTUPNÍ}}{R_1} = \frac{5}{2500} = 0,002 \text{ A} = 2 \text{ mA}$$

Na výstupu z napěťové reference je vhodné použít operační zesilovač zapojený jako sledovač. Takto zapojený OZ odděluje vstup s vysokou impedancí od výstupu s nízkou impedancí.

[11]



Obrázek 24 - Blok Úprava vstupního signálu

4.2 REGULÁTOR

Regulátor sám o sobě je součástí regulačního obvodu, jež působí na soustavu pomocí akční veličiny, za účelem minimalizovat regulační odchylku, která v dané soustavě vzniká. Jelikož na výstupu celé soustavy dostanu odchylku od žádané hodnoty, je vhodné použít některý z typů regulátorů.

Nejjednodušším typem regulátoru je proporcionální regulátor (označovaný jako P regulátor), který pouze zesiluje regulační odchylku. Výstup regulátoru (akční veličina) je tedy přímo úměrný regulační odchylce. Je dána zesílením K.

Pro přenos tohoto typu regulátoru tedy platí vztah 4.2.1:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K \quad (4.2.1)$$

kde

$U(s)$ je přenos akční veličiny,

$E(s)$ je přenos regulační odchylky.

[12]

Další, již ne tak jednoduchým typem regulátoru je integrační regulátor. Integrační regulátor je schopen plně odstranit regulační odchylku, protože je integrována. Jinak řečeno při přivedení nulového signálu se na výstupu objeví nenulový signál. Je velmi vhodný pro soustavy, kde porucha nastane jen zřídka, neboli jinak řečeno je vhodný pro soustavy s velkou setrvačností. Pro přenos integračního regulátoru platí vztah 4.2.2:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{r_i}{s} = \frac{1}{T_i \cdot s} \quad (4.2.2)$$

kde

r_i je zesílení integrační složky,

T_i je časová konstanta [s].

[12]

Na rozdíl od integračního regulátoru nelze derivační regulátor prakticky realizovat, neboť parazitní setrvačnost potlačuje přenos při vysokých frekvencích, tzn. při frekvencích, kdy má být přenos regulátoru největší. Používá se tedy pouze v kombinaci s proporcionální složkou nebo proporcionální a integrační složkou. Výstupem D regulátoru je derivovaná regulační odchylka. Pro přenos tohoto typu platí vztah 4.2.3:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_d \cdot s = T_d \cdot s \quad (4.2.3)$$

kde:

r_d je zesílení derivační složky,

T_d je časová odezva [s].

[12]

Toto vše byly základní typy regulátorů. Máme však i kombinované regulátory, které vznikají kombinací základních. První bych zmínil proporcionálně derivační regulátor. Výstup regulátoru neboli akční veličina, je paralelní kombinací proporcionální složky s derivační. Pro přenos PD regulátoru platí vztah 4.2.4:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_o + r_d \cdot s = K_R \cdot (1 + T_d \cdot s) \quad (4.2.4)$$

kde

r_o je zesílení proporcionální složky,

r_d je zesílení derivační složky,

K_R je konečné zesílení regulátoru,

T_d je časová konstanta [s].

Jelikož však je v čitateli polynom vyššího řádu, než je tomu tak ve jmenovateli, je fyzikálně nerealizovatelný. Proto většinou zahrnuje i setrvační systém prvního řádu, který časovou konstantu minimálně o řád nižší než je časová konstanta samotného regulátoru.

[12]

Regulátor, jež je složený ze všech tří složek, se nazývá proporcionálně integračně derivační (PID). Tento typ regulátoru je složitějším avšak přesnějším regulátorem. Realizace tohoto regulátoru je trochu náročnější. Nepotřebují, tak přesný typ regulátoru, proto jej nepoužijí. Pro přenos však platí vztah 4.2.5:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_o + \frac{r_i}{s} + r_d \cdot s = K_R \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s\right) \quad (4.2.5)$$

kde

- r_o je zesílení proporcionální složky,
- r_d je zesílení derivační složky,
- r_i je zesílení integrační složky,
- K_R je konečné zesílení regulátoru,
- T_d je časová konstanta derivační složky [s],
- T_i je časová konstanta integrační složky [s].

[12]

Já osobně jsem si zvolil proporcionálně integrační regulátor (dále jen PI regulátor), neboť potlačuje regulační odchylku danou rozdílem vstupního napětí a napětí na bočníku, a je schopen zesílit popřípadě zeslabit akční veličinu. Vzniká paralelní kombinací (spojením) proporcionálního a integračního členu. Pro jeho přenos PI regulátoru platí vztah 4.2.6:

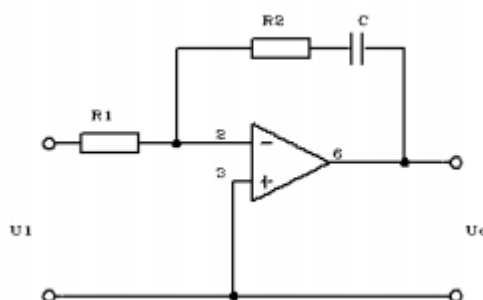
$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_o + \frac{r_i}{s} = K_r \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \quad (4.2.6)$$

kde

- r_o je zesílení proporcionální složky,
- r_i je zesílení integrační složky,
- K_R je konečné zesílení regulátoru,
- T_i je časová konstanta integrační složky [s].

[8], [12]

Nejjednodušší realizací tohoto regulátoru je zapojení pomocí OZ. Toto zapojení je zobrazeno na obrázku 25.



Obrázek 25 - PI regulátor vytvořený pomocí OZ [8]

Přenos PI regulátoru je reálně tedy:

$$\frac{U_1}{U_0} = -\frac{R_2 \cdot C \cdot p + 1}{R_1 \cdot C \cdot p} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_2 \cdot C \cdot p + 1}{R_2 \cdot C \cdot p} = -K \cdot \frac{\tau \cdot p + 1}{\tau \cdot p} = -K \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau \cdot p}\right) \quad (4.2.6)$$

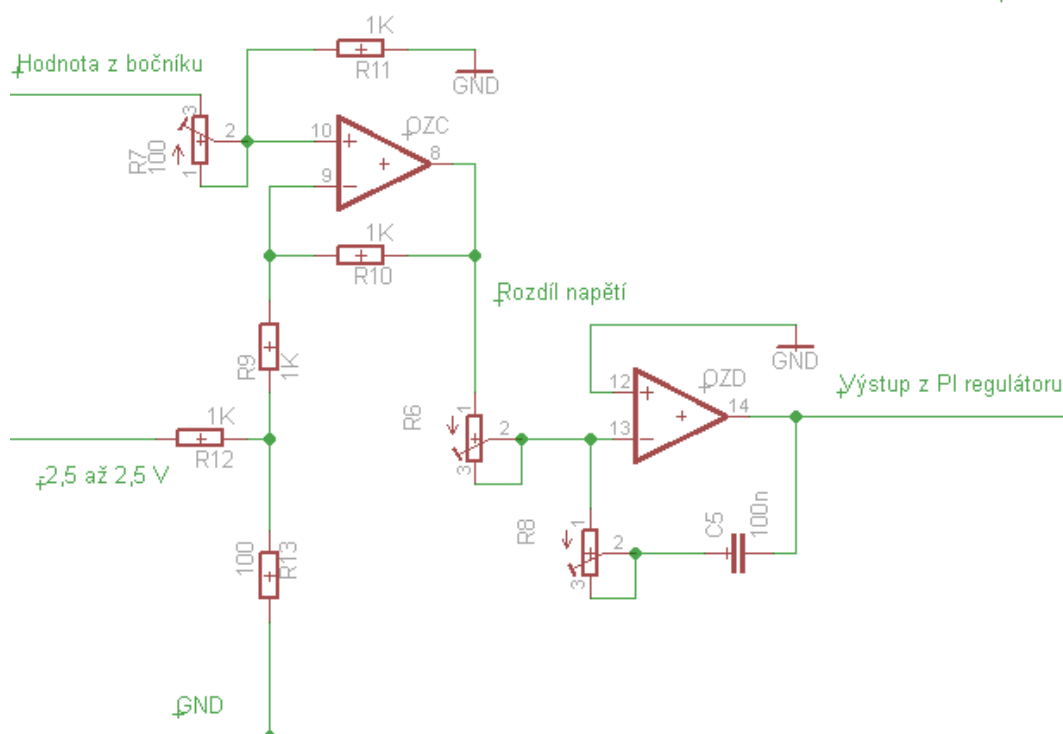
kde

- $K = \frac{R_2}{R_1}$ je zesílení proporcionální složky,
- $\tau = R_2 \cdot C$ je časová konstanta [s].

[8], [12]

Před přivedením napětí do PI regulátoru, je odečtena hodnota ze zpětné vazby (z bočníku umístěného za cívkou) od hodnoty z výstupu *Úpravy vstupního signálu* pomocí dalšího OZ, zapojeného jako rozdílový zesilovač, se zesílením $A = 1$. Hodnota napětí z bočníku je však dána velikostí odporu tohoto prvku ($1\ \Omega$) a napětím na výstupu (cívkách). V případě největších cívek je hodnota napětí na bočníku při přivedení potřebného napětí na cívkách, tzn., aby se vytvořilo pole s magnetickou indukčností $1\ \text{mT}$, rovna proudu, což znamená $0,238\ \text{V}$.

Hodnota vstupního napětí je $2,5\ \text{V}$. Tuto hodnotu napětí jsem zmenšil na desetinu, abych jej mohl patřičně odečíst od napětí ze zpětné vazby pomocí rozdílového zesilovače. Hodnota tohoto rozdílu je následně přivedena na vstup PI regulátoru, vytvořeného pomocí OZ (obrázek 26). Z výstupu PI regulátoru pak vychází akční veličina, která je závislá na požadavku napětí na cívkách a zesílení.



Obrázek 26 - PI regulátor

4.3 KONCOVÝ ZESILOVAČ

Jako koncový zesilovač používám výkonový zesilovač, jež slouží k zesílení vstupního signálu (akční veličiny z výstupu PI regulátoru) na požadovaný výstupní signál. Existuje mnoho druhů výkonových zesilovačů. Podle umístění pracovního bodu se dělí na:

- Třída A - s trvalým klidovým proudem A
- Třída B - s nulovým klidovým proudem B
- Kombinovaná AB - kombinovaná
- Třída s nulovým klidovým proudem a předpětím C

[5]

4.3.1 JEDNOČINNÝ ZESILOVAČ TŘÍDY A

Pracovní bod tohoto typu zesilovače je umístěn uprostřed lineární částí charakteristiky. Kvůli tomu je maximální účinnost výkonového zesilovače třídy A je 25% celkové účinnosti při plném vybuzení. 75%

je přeměno v teplo, které musí být uchlazeno. Chlazení je drahé a náročné, proto jej ve svém návrhu nevyužiji.

[5]

4.3.2 DVOJČINNÝ ZESILOVAČ TŘÍDY B

Je obdobný jako zesilovač třídy A, s rozdílem polohy klidového pracovního bodu. Jsou použity dva tranzistory. Jeden tranzistor zesílí kladnou půlvlnu vstupního signálu a druhý zesílí zápornou. Oproti jednočinnému zesilovači třídy A výrazně šetří energie a má daleko menší energetické nároky, tím pádem dosahuje účinnosti až okolo 78%.

[5]

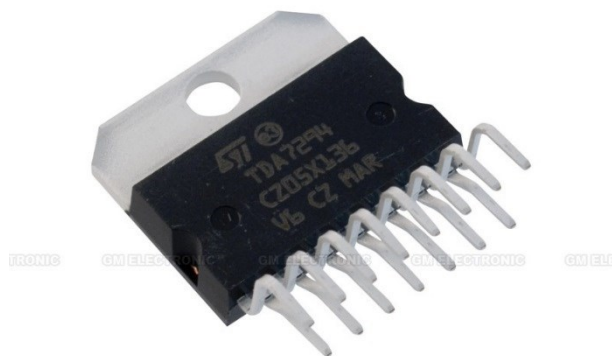
4.3.3 DVOJČINNÝ ZESILOVAČ TŘÍDY AB

Tato třída kombinuje vlastnosti obou zesilovačů A i B. Do koncových vstupů je přiveden klidový proud podobně jako u třídy A, tento proud je velmi malý. Má podstatně menší zkreslení než tomu bylo u třídy B, avšak je méně účinný. Účinnost se pohybuje okolo 70%. Což bohatě stačí pro mé účely, neboť navržené zařízení nemá velké energetické nároky.

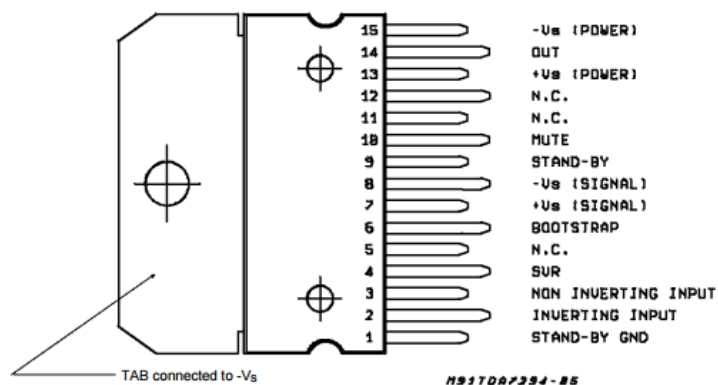
[5]

Z nabídky koncových zesilovačů na stránkách www.gme.cz jsem na základě požadovaného výstupního proudu, napětí a výkonu vybral zesilovač TDA7294V (obrázek 26). Jedná se o audio zesilovač třídy AB. Tento zesilovač má následující parametry:

- Typ: Nízko frekvenční DMOS audio zesilovač s funkcí MUTE a ST-BY
- Maximální rozsah: ± 50 V
- Maximální výstupní proud: 10 A
- Provozní teplota: 0 až 70 °C

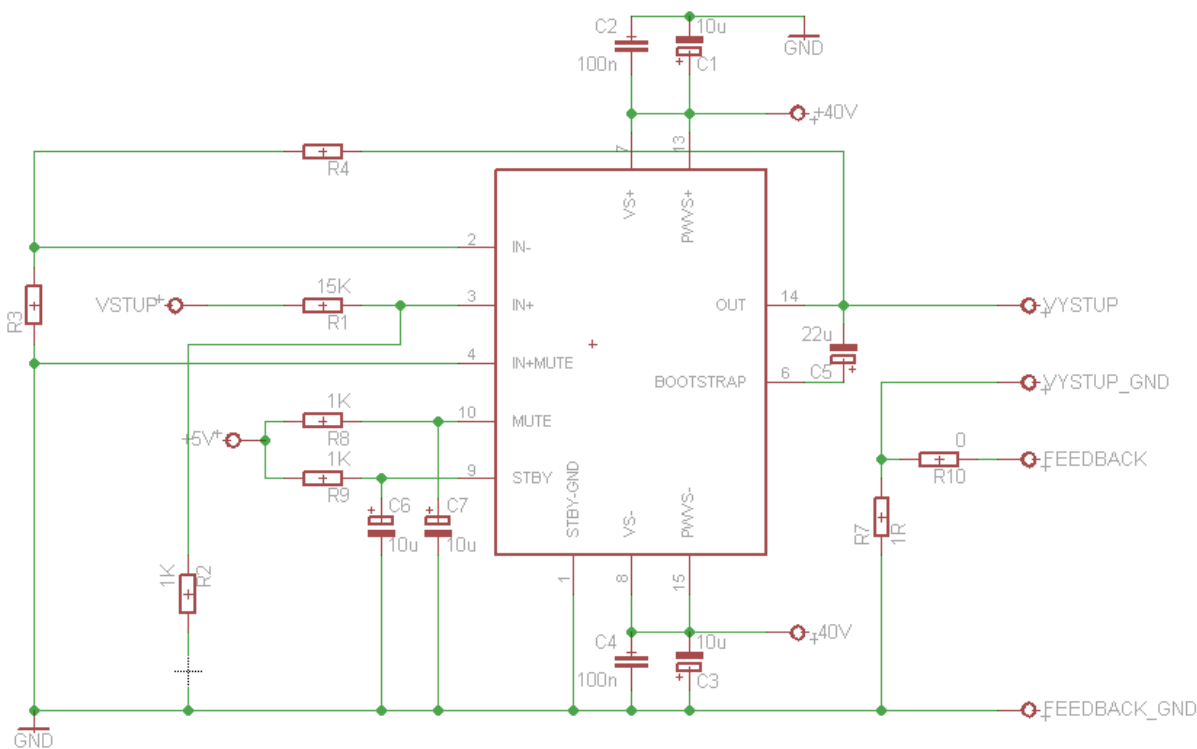


Obrázek 27 - Koncový zesilovač TDA9294



Obrázek 28 - Zobrazení pinů koncového zesilovače

Pro správnou funkci a sepnutí zesilovače je nutné dle datasheetu přivést napětí na piny pro MUTE a STD-BY (9 a 10 – viz obrázek 27). Napětí, které je nutné přivést, musí být větší, než 3,5 V jinak tyto dva režimy se nesepnou. Maximální velikost tohoto napětí je dána velikostí napětí napájení. Na piny 7,8,13 a 15 jsem přivedl napájecí napětí rovno ± 40 V (dostačující napětí pro vytvoření dostatečně velké magnetické indukčnosti). Pin 6 BOOTSRAP jsem dle datasheetu připojil k výstupnímu pinu 14 přes elektrolytický kondenzátor. To má za následek zvýšení časové konstanty pro stabilizaci. Na neinvertující vstup je přivedeno napětí z PI regulátoru, které je sníženo na velikost několika mV (10x zmenšené). To je zapříčiněno funkčností tohoto koncového zesilovače, neboť napětí na vstupu musí být v řádech stovek mV.



Obrázek 29 - Schéma zapojení TDA7294V

Zesílení výsledného signálu na cívkách je dáno volbou rezistorů R_3 a R_4 (obrázek 28). Jak už bylo zmíněno pro vygenerování magnetického pole s magnetickou indukčností 1 mT je zapotřebí přivést na ně rozdílné napětí.

4.3.4 ZESÍLENÍ

Obdobně jako u operačních zesilovačů v neinvertujícím zapojení, tak i u mého koncového zesilovače platí vztah pro výstupní napětí (vztah 4.3.1):

$$U_{OUT} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot U_{IN} \quad (4.3.1)$$

Pro každou z cívek musí být přivedeno rozdílné napětí na výstupu. Zesílení jsem si tedy spočítal tak, že při potřebném výstupním napětí, my PI regulátor bude dodávat napětí v rozsahu $\pm 7,74$ V pro vygenerování požadovaného napětí na výstupu. Tohoto napětí jsem docílil i v testování řízení (viz níže). Jelikož nechci zbytečně zatěžovat operační zesilovač v zapojení jako PI regulátor, a chci mít rezervu, budu toto napětí více než dostačující. Zesílení každé cívky lze vidět společně s volbou rezistorů v tabulce 4.

Tabulka 4 - Zesílení pro jednotlivé cívky

Cívka	R_4	R_3	Zesílení
Největší	47 k Ω	1 k Ω	48
Střední	33 k Ω	1 k Ω	34
Malá	22 k Ω	1 k Ω	23

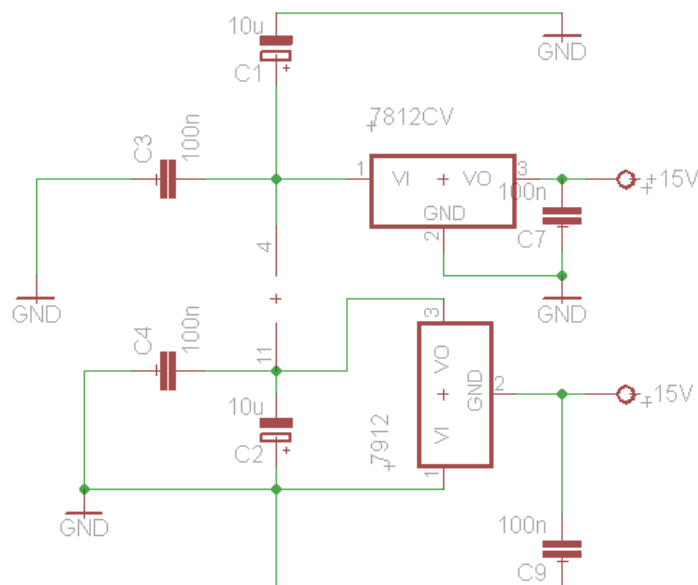
4.4 NAPÁJENÍ

Celá soustava, aby správně fungovala, musí být vhodně napájena. Jelikož potřebuji celkem 4 operační zesilovače pro jeden pár cívek, zvolil jsem, obdobně jako u koncového zesilovače, z nabídky na stránkách www.gme.cz. Vybral jsem TL064 DIP14, jež má čtyři operační zesilovače v jednom pouzdře. Ty je vhodné napájet 12 V, avšak ve škole není symetrický zdroj na ± 12 V. Proto jsem použil zdroj ± 15 V a k němu připojil stabilizátory pro kladné i záporné napětí. Vybral jsem stabilizátor pevného napětí TAIWAN SEMICONDUCTOR 7912 pro -12 V a ST MICROELECTRONICS/THOMSON 7812CV. Jejich parametry jsou následující:

Tabulka 5 - Parametry stabilizátorů

Typ	7912	7812CV
Výstupní napětí	+12 V	- 12 V
Výstupní proud	1 A	1,5 A

Napájení koncového zesilovače TDA7294 je vyobrazeno výše na obrázku 28 a popsáno výše. Hodnoty kondenzátorů jsem zvolil dle přiloženého datasheetu jako filtrační kondenzátory. Napájení pro OZ je vykresleno na obrázku 29. Stabilizátor 7912 pro -12 V je zapojen trochu jinak, neboť piny jsou prohozené. Pin číslo 2 slouží jako vstup stabilizátoru, pin 1 je zem a pin 3 výstup. Na vstup a výstup jsem opět připojil filtrační kondenzátory.



Obrázek 30 - Napájení operačních zesilovačů

4.5 NÁVRH CHLADIČŮ

Koncový zesilovač a oba použité stabilizátory jsou velmi tepelně závislé a vytvářejí velké množství tepla, které je nutné odvést. Není doporučeno překročit pracovní teplotu, ve které tyto součástky pracují správně. Proto je důležité navrhnout vhodný chladič pro jednotlivé prvky. Dimenzování chladičů a obecně problematika chlazení je obsáhlá. Místo výpočtů se často používají simulace, avšak zcela nej přesnější metodou je měření, kde hlavní roli hrají parametry – rozměr, typ materiálu a povrchové úpravy chladiče. Pro zjednodušený výpočet se využívá vztah:

$$R_{TH} = \frac{T_J - T_A}{P_Z} \quad (5.8.1)$$

kde

$T_J - T_A$ je tepelný spád neboli rozdíl teplot mezi jednotlivými vrstvami [°C]

R_{TH} je celkový tepelný odpor [°CW⁻¹]

P_Z je ztrátový výkon [W]

Celkový tepelný odpor R_{TH} se skládá z několika dílčích tepelných odporů (odporů mezi jednotlivými vrstvami). Jedná se o součet tepelného odporu R_{THJC} (tepelný odpor mezi polovodičem a pouzdrem, který je udán v katalogu součástky), R_{THS} (tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem) a R_{THR} (mezi chladičem a okolím), čím nižší je hodnota tepelného odporu, tím lépe je teplo odváděno.

$$R_{TH} = R_{THJC} + R_{THS} + R_{THR} \quad (5.8.2)$$

[10][11]

4.5.1 CHLADIČ PRO KONCOVÝ ZESILOVAČ TDA7294

Limitní teplota T_J pro tento prvek je 150 °C. Teplotu okolí jsem si zvolil 40°C. Další důležitá teplota je teplota T_C , což je teplota pouzdra, ta se spočítá jako:

$$T_C = T_J - (R_{THJC} \cdot P_Z) \quad (5.8.3)$$

Potřebuji tedy ještě hodnotu ztrátového výkonu, ten se spočítá:

$$P_Z = P_P - P \quad (5.8.4)$$

kde

$P_P = U \cdot I$ je příkon prvku [W]

P je výkon na výstupu [W]

Příkony pro jednotlivé koncové zesilovače jsou tedy závislé na výstupním proudu a ztrátovém výkonu na cívkách. Hodnoty Příkonů a ztrátových výkonů vidíte v tabulce 5.

Tabulka 6 - Výkony a příkony pro jednotlivé cívky

Cívky	Příkon	Ztrátový výkon cívek	Celkový ztrátový výkon
Největší	19,073 W	8,734 W	10,338 W
Střední	16,293 W	5,444 W	10,848 W
Nejmenší	13,512 W	3,106 W	10,407 W

Následně si můžu spočítat teploty T_C , tepelný spád a celkový tepelný R_{TH} odpor dle výše zmíněného vzorce, kde $R_{THC} = 1,5 \text{ } ^\circ\text{CW}^{-1}$.

Tabulka 7 - Tepelné odpory a teplotní spády

Cívky	T_C	$T_C - T_O$	R_{TH}
Největší	134,493 $^\circ\text{C}$	94,493 $^\circ\text{C}$	9,096 $^\circ\text{CW}^{-1}$
Střední	133,728 $^\circ\text{C}$	93,728 $^\circ\text{C}$	8,6395 $^\circ\text{CW}^{-1}$
Nejmenší	134,3895 $^\circ\text{C}$	94,3895	9,0702 $^\circ\text{CW}^{-1}$

Na základě tohoto výsledku, lze v katalogu či na stránkách www.gme.cz nalézt vhodný chladič. Jak již jsem výše zmínil, tepelný odpor je roven součtu jednotlivých složek (vztah 5.8.2).

$$R_{TH} = R_{THJC} + R_{THS} + R_{THR} \quad (5.8.5)$$

kde

$R_{THJC} = 1,5 \text{ } [^\circ\text{CW}^{-1}]$

$R_{THS} = 0,3 \text{ } [^\circ\text{CW}^{-1}]$ pro přímé připojení k chladiči

R_{THR} je tepelný odpor chladiče $[^\circ\text{CW}^{-1}]$

Jelikož má tři stejná zapojení s rozdílnými hodnotami, vybral jsem jeden velký chladič, jehož tepelný odpor $R_{THR} = 1,1 \text{ } ^\circ\text{CW}^{-1}$. Pomocí úprav zmíněných vztahů jsem si spočítal jak velký je schopen odvést ztrátový výkon:

$$P_Z = \frac{T_J - T_A}{R_{TH}} = \frac{150 - 40}{1,5 + 0,3 + 1,1} = 37,931 \text{ W}$$

Je to více, ale obecně je lepší předimenzovat chladič, než aby došlo k poškození výkonové součástky. Tento chladič však není zcela malý, jeho rozměry jsou vyobrazeny na obrázku 32.

4.5.2 CHLADIČ PRO STABILIZÁTORY

Obdobně jako pro koncový zesilovač je i u stabilizátoru L7812CV limitní teplota 150 °C. U TS7912 je to však 125°C Teplota okolí je taktéž stejná, a to 40 °C. Ztrátový výkon je však rozdílný, taktéž i ostatní parametry dle katalogových hodnot, které lze vidět v tabulce 8.

Tabulka 8 - parametry stabilizátorů

Součástka	TS7912	L7812CV
P_Z	3 W	4,5 W
R_{THJC}	3 °CW ⁻¹	5 °CW ⁻¹
T_C	114 °C	127,5 °C
$T_C - T_O$	74 °C	87,5 °C
R_{TH}	24,6 °CW ⁻¹	19,44 °CW ⁻¹

Na základě tohoto výsledku jsem opět vyhledat vhodný chladič.

Hodnoty tepelných odporů jsou přibližně stejné, jsou to obě velká čísla. Pro uchlazení by stačilo nepoužívat chladič. Avšak pro jistotu jsem vybral chladič, jehož tepelný odpor $R_{THR} = 21\text{ °CW}^{-1}$. Pomocí úprav zmíněných vztahů jsem si zase spočítal jak velký je schopen odvést ztrátový výkon:

$$P_{Z1} = \frac{T_{J1} - T_A}{R_{TH1}} = \frac{125 - 40}{3 + 0,3 + 21} = 3,497\text{ W}$$

a

$$P_{Z2} = \frac{T_{J2} - T_A}{R_{TH2}} = \frac{150 - 40}{5 + 0,3 + 21} = 4,183\text{ W}$$

Byť je druhý výsledek o něco nižší, není nutné dávat silnější chladič, nejedná se o tak zatíženou součástku. Při otestování mi dokonce postačilo k nim mít nepřipojený chladič, aby fungovali zcela správně.



Obrázek 31 - chladič pro stabilizátory



Obrázek 32 - Chladič pro koncové zesilovače

4.6 TESTOVÁNÍ ŘÍZENÍ

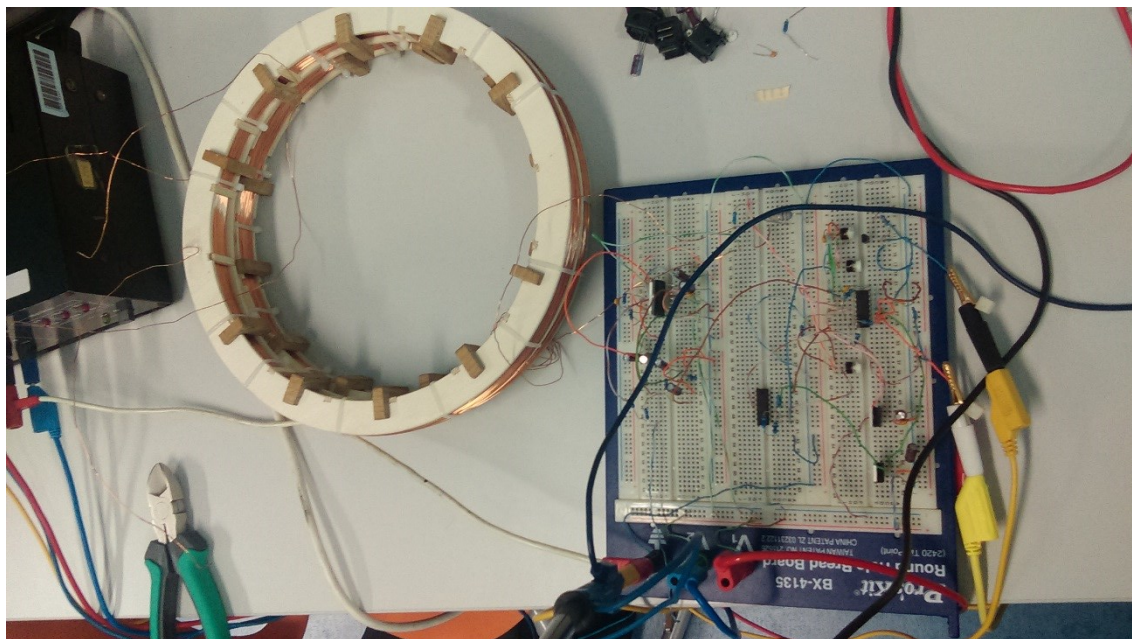
Před samotným vyhotovením desek, jsem si otestoval řízení na nepájivém poli (obrázek 33).

Pro zmenšení zatížení zesilovač jsem jej napájel symetrickým zdrojem s napětím pouze ± 15 V (pro případ, abych nemusel použít chladič). Napětí na napájecích vstupech zesilovače TDA7294 ukázané na multimetru firmy Agilent bylo $-15,745$ V a $15,497$ V. Stejně napětí jsem přivedl i na vstupy stabilizátorů ($15,519$ V a $-15,458$ V). Na jejich výstupu se mi poté objevilo napětí $12,127$ V a $-11,777$ V. Napájení tedy je tedy ověřené. Součástky jsou správně napájené, což byl první krok testování.

Stejnoseměrné zdroje napětí jsem připojil na vstupy bloku *Úprava vstupního signálu*. Jeden ze zdrojů byl pro samotné ovládání napětí na cívkách, a druhé bylo pevné napětí 5 V pro napěťovou referenci. V případě přivedení 5 V na vstup jsem na výstupu tohoto bloku dostal hodnotu $2,472$ V. Když jsem však nastavil na vstupu 0 V, tak se na výstupu objevilo napětí $-2,483$ V. Nulové napětí na výstupu jsem dostal při nastavení $2,5$ V na vstupu. Blok *Úprava vstupního napětí* tedy, byť s malými odlišnostmi, taktéž pracoval dle očekávání.

Následně jsem obdobně změřil napětí na rozdílovém zesilovači, na nějž je přiveden napětí z výstupu z bloku *Úprava vstupního signálu* a napětí ze zpětné vazby. Opět ukazoval správně rozdíl těchto dvou napětí.

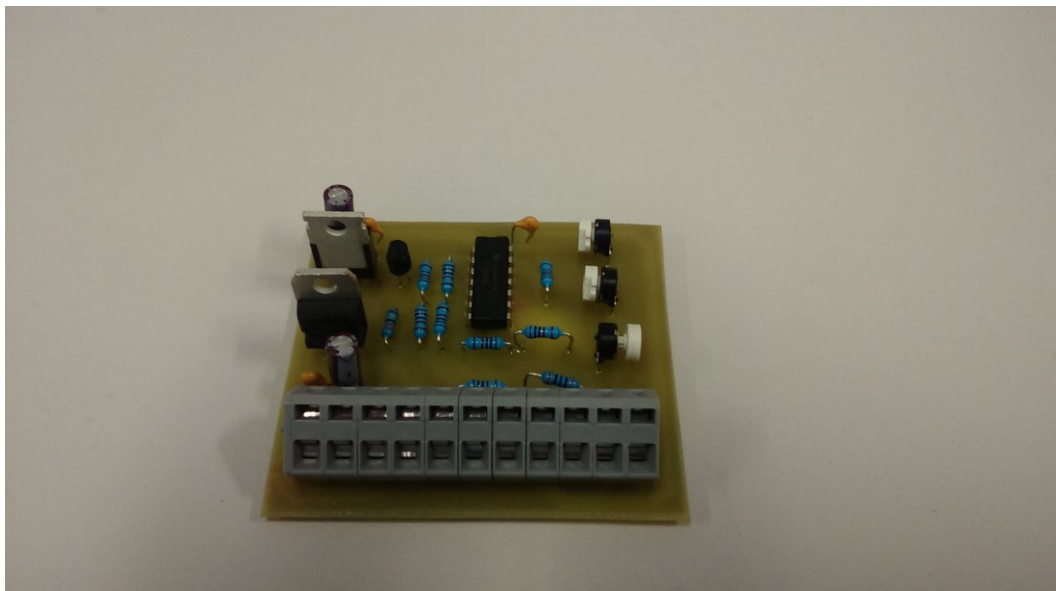
Výstupem PI regulátoru je akční veličina, která závisí na požadovaném napětí na cívkách. Jelikož jsem chtěl na cívkách dostat napětí přibližně ± 7 V a zesílení jsem měl nastavené pomocí rezistorů na hodnotě 11 (hodnoty odporů bylo $1\text{ k}\Omega$ a $10\text{ k}\Omega$, což znamená zesílení $10 + 1$ pro neinvertující zapojení), na vstupu se mi mělo objevit napětí něco okolo $\pm 0,636$ V. Objevilo se mi, však napětí v rozsahu $\pm 0,717$ V. Musím ještě podotknout, že mezi vstupem výkonového zesilovače a PI regulátoru jsem měl dělič, který mi napětí z PI regulátoru snížil na desetinu. Po nastavení hodnot odporu na potenciometrech se tento rozsah spravil a vyrovnal na $\pm 0,649$ V. To znamená, že i PI regulátor fungoval správně, neboť přivedením akční veličiny (napětím $\pm 6,49$ V) na vstup koncového zesilovače, jsem skutečně dostal požadované napětí na výstupu.



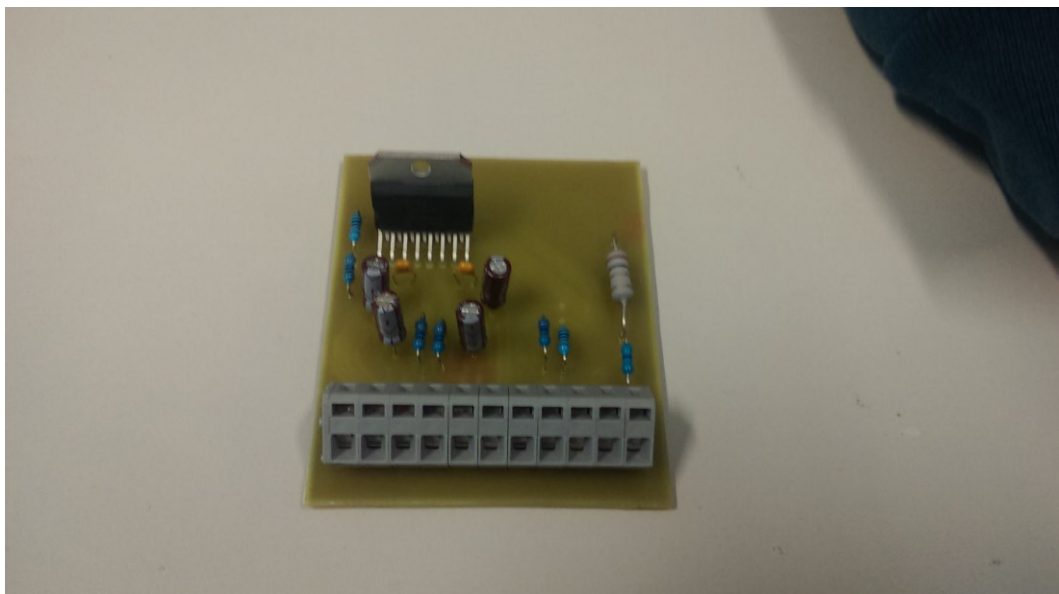
Obrázek 33 - Zapojení na nepájivém poli pro testování řízení

4.7 DPS

Návrh desek jsem vytvořil v programu Eagle 6.6.0. Vycházel jsem ze schématu vytvořeného ve stejném programu. Cesty a umístění prvků jsem navrhl tak, aby deska nezabírala příliš mnoho místa. Zároveň jsem musel brát v potaz velikosti chladičů pro stabilizátory a koncové zesilovače. Chladič pro koncové zesilovače je umístěn na všech třech deskách s koncovými zesilovači. Desky po realizaci ve školní laboratoři lze vidět na obrázku 34 a 35. Nesmím opomenout, že počet těchto desek je 3 a 3, pro každý pár cívek je vždy určená jedna deska s předzesilovací částí a jedna deska s koncovým zesilovačem.



Obrázek 34 - DPS před zesilovací částí



Obrázek 35 - DPS koncového zesilovače

5 ZÁVĚR

Tato práce je velmi rozsáhlá, neboť vyžaduje znalosti a dovednosti z mnoha oborů, nejen z oboru elektrotechnika. Díky tomuto faktu jsem si vyzkoušel, jak moc souvisí tvorba zařízení se znalostí jednotlivých oborů. V této práci jsem se totiž zabýval nejen elektrickou a řídicí částí, ale i konstrukcí a problematikou realizování.

Před samotným návrhem jsem se blíže seznámil s problematikou vytváření magnetických polí. Na základě informací získaných z mnoha zdrojů, jsem navrhl zařízení, které vytváří magnetické pole ve třech osách s magnetickou indukčností 1 mT ve všech směrech. Použil jsem Helmholtzovy cívky, které jsou známy tím, že při dodržení vzdáleností cívek mezi sebou, vytváří téměř homogenní magnetické pole. První částí tedy byla spíše konstrukční část, bez níž bych nemohl pokračovat k části řízení, která je mému studijnímu oboru bližší.

Řízení jsem navrhl patřičně ke konstrukci. Vytvořil jsem tři páry Helmholtzových cívek, které pro generování magnetického pole s požadovanou magnetickou indukčností potřebují rozdílná napětí. Vyrobil jsem tedy tři řídicí obvody s různým výstupním zesílením. První část každého obvodu byla stejná. Na vstup jsem přivedl řídicí napětí v rozsahu 0 až 5 V, od kterého jsem odečetl pomocí napěťové reference napětí 2,5 V. Tím jsem dosáhl vytváření magnetického pole se zápornou polaritou. Z výstupu jsem pomocí bočnicku odvedl napětí rovno proudu. Pomocí odečtení tohoto napětí s napětím na výstupu bloku *Úprava vstupního napětí* (viz výše) jsem dostal regulační odchylku, jež je přivedena na vstup PI regulátoru. Ten poté pomocí akční veličiny řídí koncový zesilovač. Celé řízení jsem samozřejmě otestoval a vše byt' s malými rozdíly, fungovalo dle mých představ.

Na této bakalářské práci jsem si tedy vyzkoušel pro mě mnoho nových věcí (tvorba konstrukce, konstrukční návrh, návrh řízení, realizace řízení, regulování soustavy, návrh a tvorba desek plošných spojů). Chtěl bych i nadále pracovat na této práci. Vylepšit a inovovat konstrukci či vyzkoušet si řízení pomocí počítačové měřicí karty.

Jelikož celá tato práce slouží jako ukázkový a studijní model pro studenty oboru *Řídicí a informační systémy*, chtěl bych si taktéž podílet i na tvorbě laboratorních úloh, aby si studenti mohli vyzkoušet práci s magnetickým polem, tak jako jsem si to vyzkoušel já v této práci.

LITERATURA

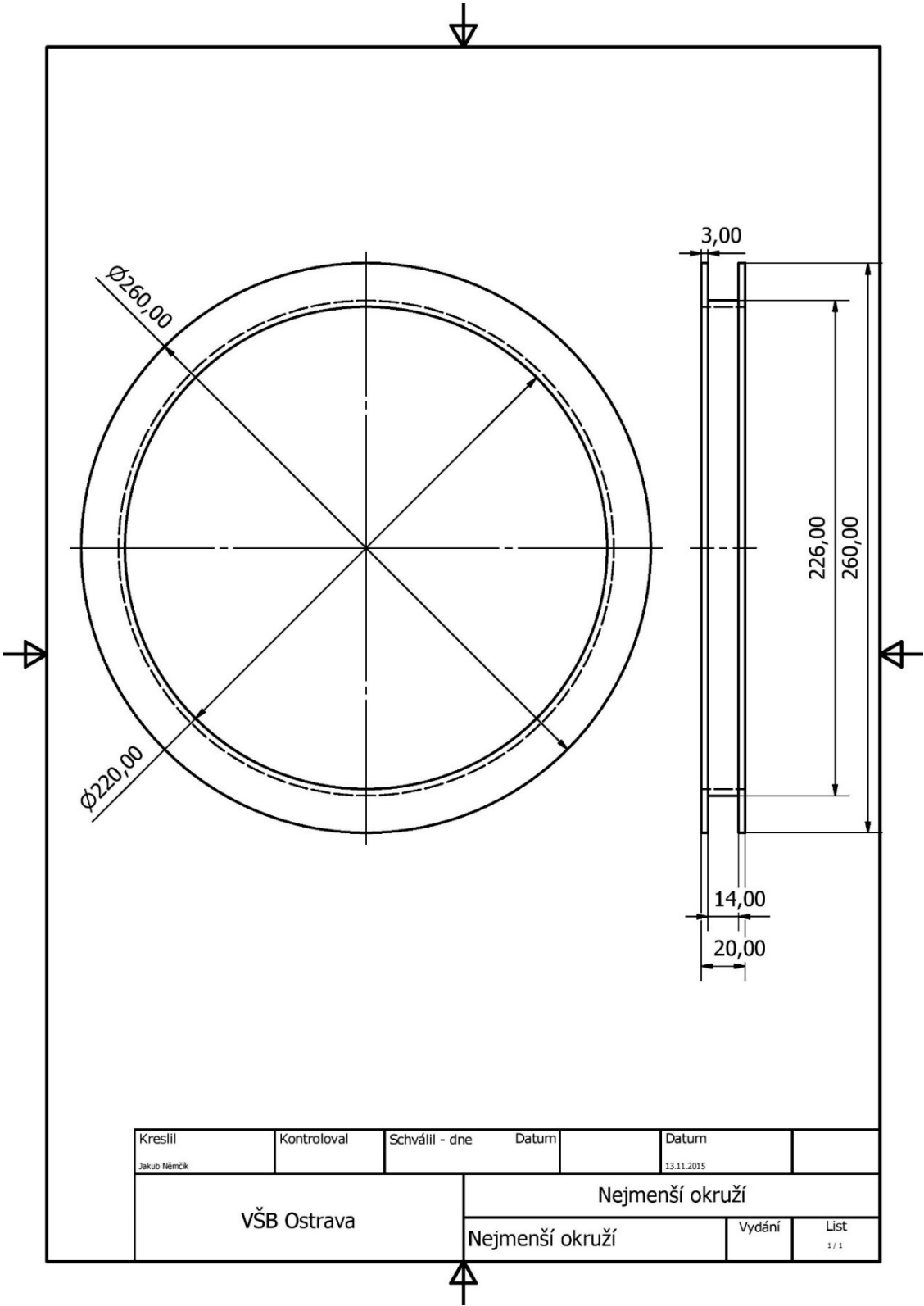
- [1] KNOEPFEL, Heinz Enzo. *Magnetic fields: a comprehensive theoretical treatise for practical use*. New York: Wiley, c2000, xxi, 619 s. ISBN 0-471-32205-9.
- [2] Sources of Magnetic Fields. In: MIT [online]. Massachusetts: Institute of Technology, 2014 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide09.pdf>
- [3] Helmholtz coils. In: Department of Physics & Astronomy [online]. Embry-Riddle Aeronautical University: Dr. Darrel Smith, 2007 [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://physicsx.pr.erau.edu/HelmholtzCoils/>
- [4] Magnetické pole. In: *SPŠE Mohelnice* [online]. Mohelnice: Střední průmyslová škola elektrotechnická, 2006 [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm>
- [5] KOTISA, Zdeněk. NF zesilovače: Tranzistorové výkonové zesilovače. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 95 s. ISBN 80-730-0065-2.
- [6] Zesilovače biologických signálů. In: *Noel* [online]. Praha: Laboratoř zpracování řeči a analýzy signálů, 2011 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://noel.feld.cvut.cz/vyu/x31let/Lectures/02_Zesilovace.pdf
- [7] PAVEL BRANDŠTETTER A KOL. *Elektronika - Prvky elektronických obvodů* [online]. Ostrava: Ediční středisko VŠB-TUO, 2007, s. 138-143 [cit. 2015-04-17]. ISBN 978-80-248-1481-0.
- [8] PI regulátor. In: Katedra elektroniky [online]. Ostrava: VŠB TU - Ostrava, 2008 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/TPREP/PI.pdf>
- [9] Návrh chladiče. In: Kutilův koutek [online]. 2006 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.dmaster.wz.cz/postupy/chladice/chladice.htm>
- [10] Výpočet chladiče. In: Pendatron [online]. Praha: Pendatron, 2013 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?219&vypocet_chladice
- [11] PUNČOCHÁŘ, J. Operační zesilovače v elektronice. 5. vydání. Praha: BEN, 2002. 495 s. ISBN 80-7300-059-8.
- [12] Analýza dynamických vlastností regulačních obvodů. In: Elektronický výukový systém [online]. Ostrava: VŠB TU - Ostrava, 2016 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://lms.vsb.cz/pluginfile.php/260819/mod_resource/content/1/06%20kap.pdf

- [13] TDA7294V koncový zesilovač. In: *GME electronics* [online]. Austrálie: SGS-THOMSON Microelectronics, 2012 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/313/094/tda7294v-datasheet-1.pdf>
- [14] TL064 operační zesilovače. In: *GME electronics* [online]. USA: Intersil Corporation, 2005 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/311/011/tl064-datasheet-1.pdf>
- [15] Napěťová reference LM285Z-2.5. In: *GME electronics* [online]. USA: Semiconductor Components Industries, 2004 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/129/lm285z-2-5-datasheet-1.pdf>
- [16] Stabilizátor Taiwan semiconductor 7912. In: *GME electronics* [online]. Taiwan: Taiwan semiconductor, 2004 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/026/7912-datasheet-1.pdf>
- [17] Stabilizátor ST MICROELECTRONICS/THOMSON 7812CV. In: *GME electronics* [online]. USA: STMicroelectronics, 2011 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/202/7812-tenka-ploska-na-chladic-datasheet-1.pdf>

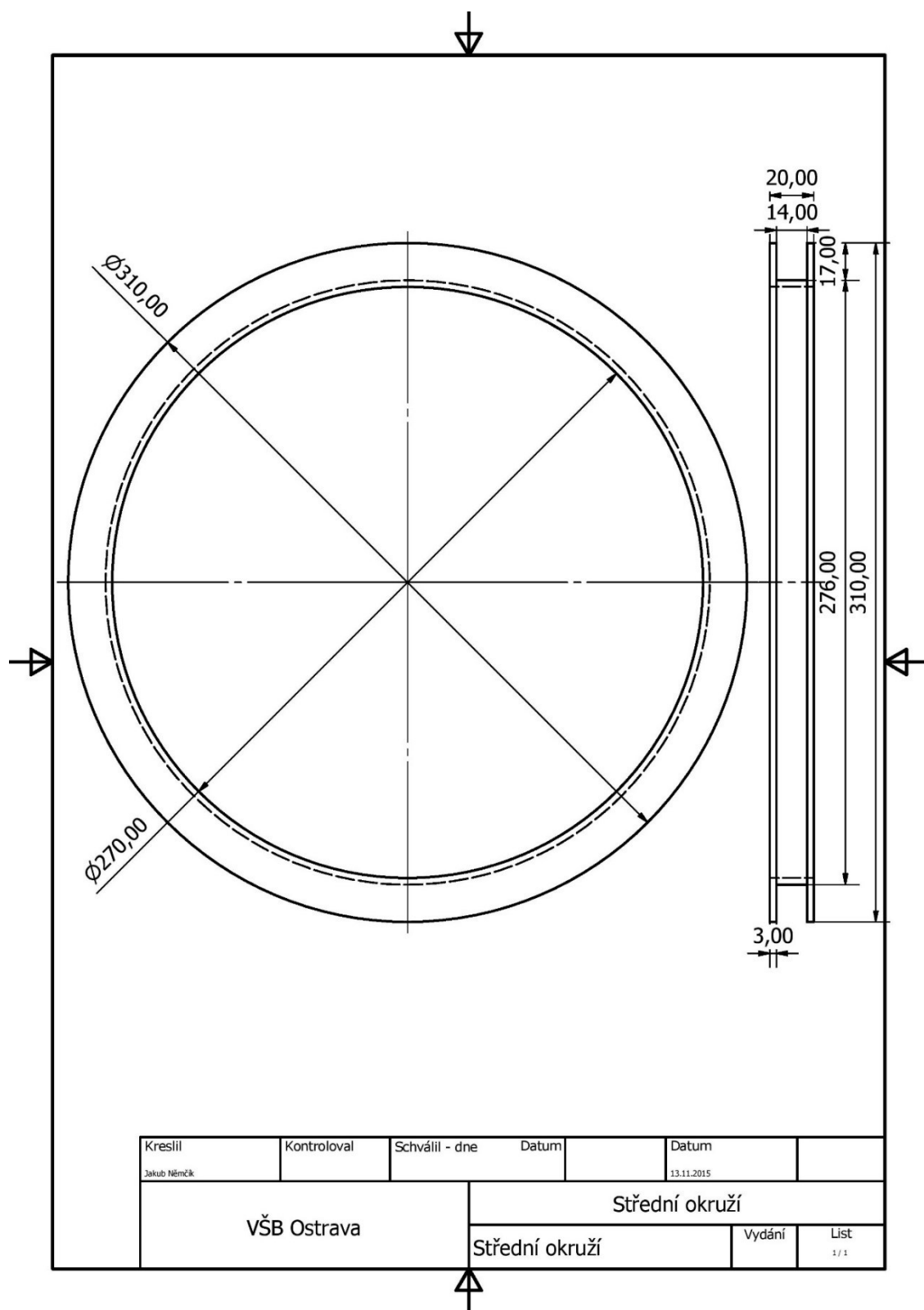
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1:	Výkresy	I
Příloha 2:	Schémata řídicí částí	IX
Příloha 3:	Schéma pro DPS koncového zesilovače	XI
Příloha 4:	Přílohy na CD – Přílohy BP	XII

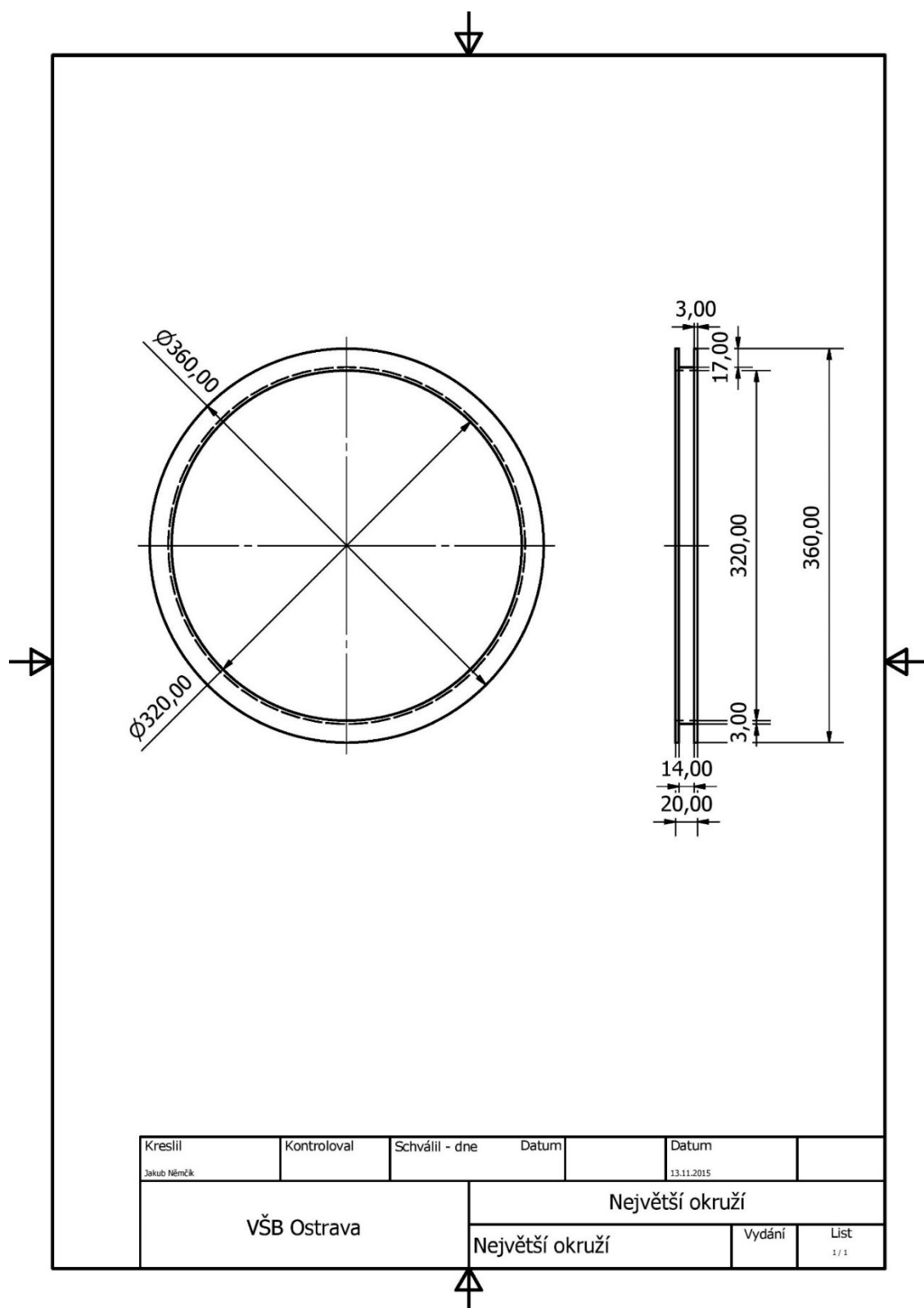
PŘÍLOHA 1: VÝKRESY



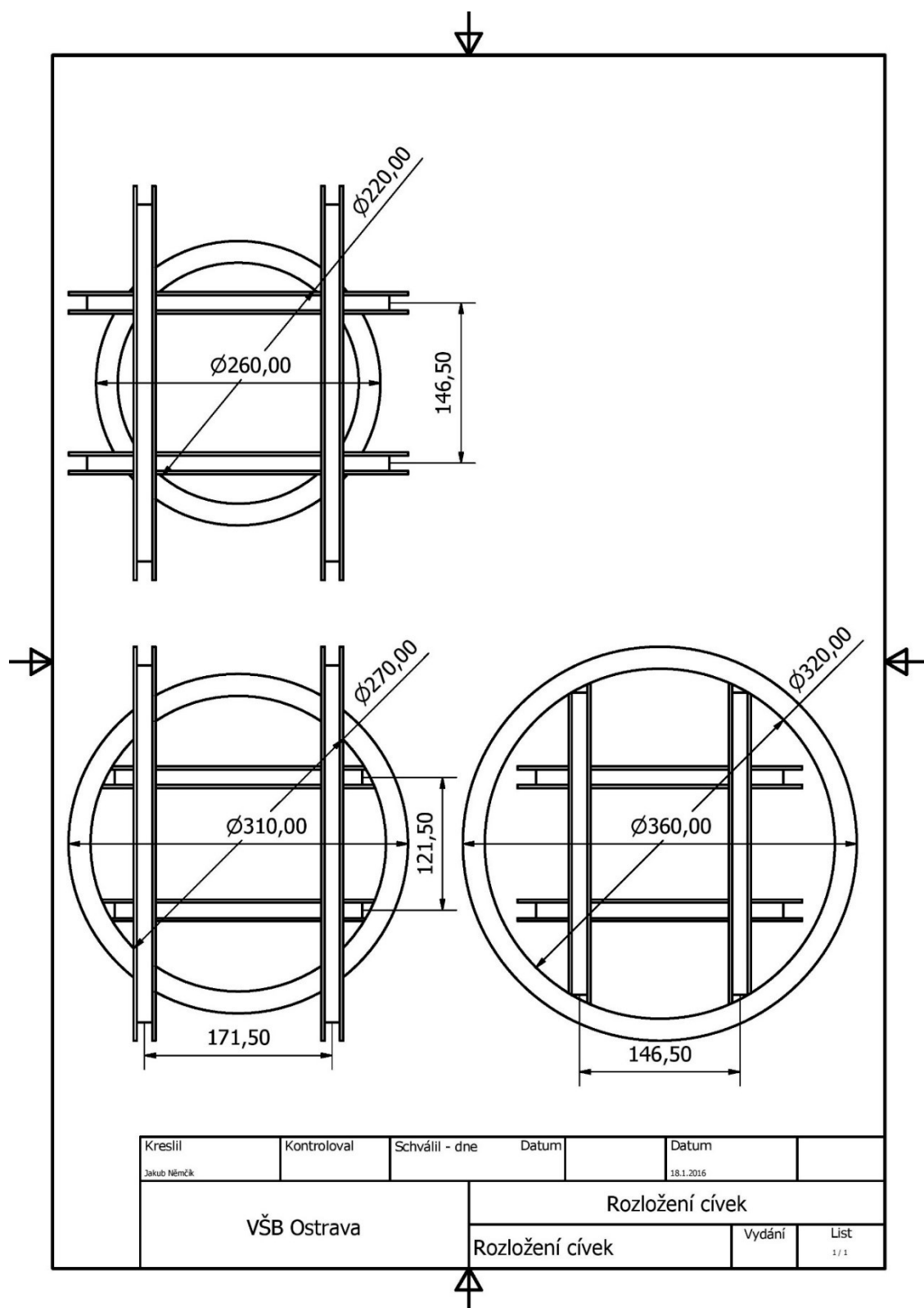
Příloha 1. a: Výkres pro nejmenší okruží



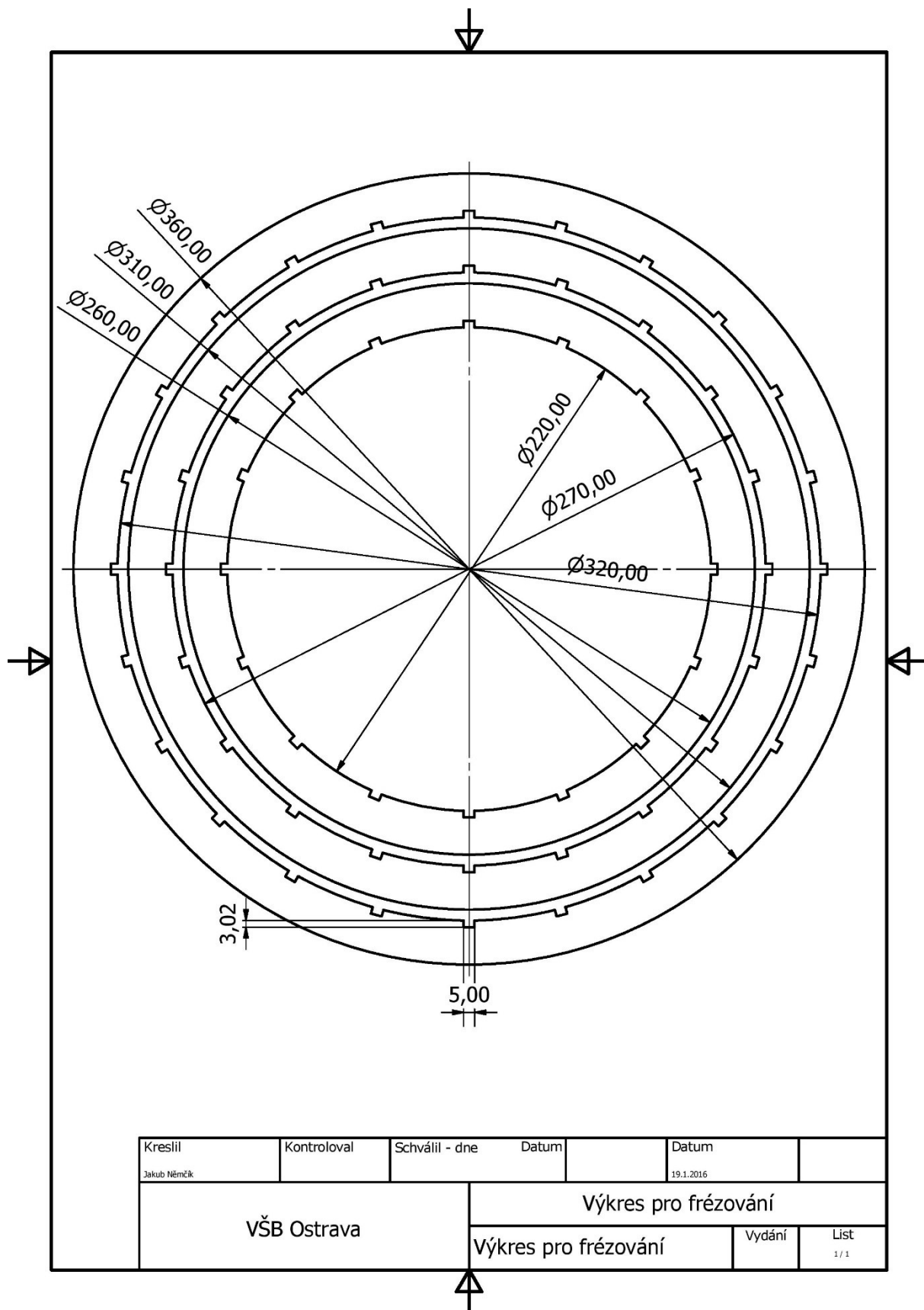
Příloha I. b: Výkres pro střední okružní



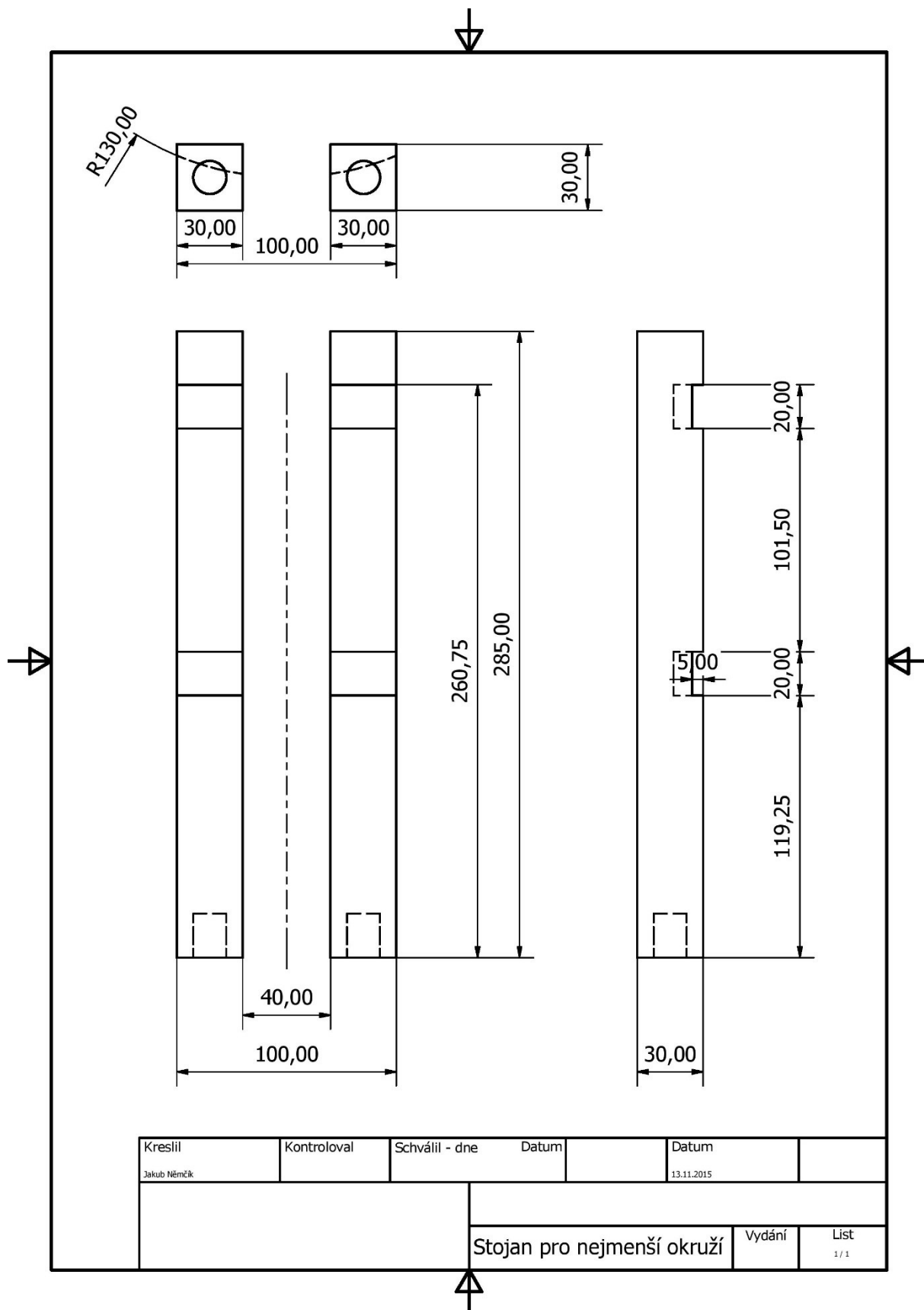
Príloha 1. c: Výkres pro největší okruží



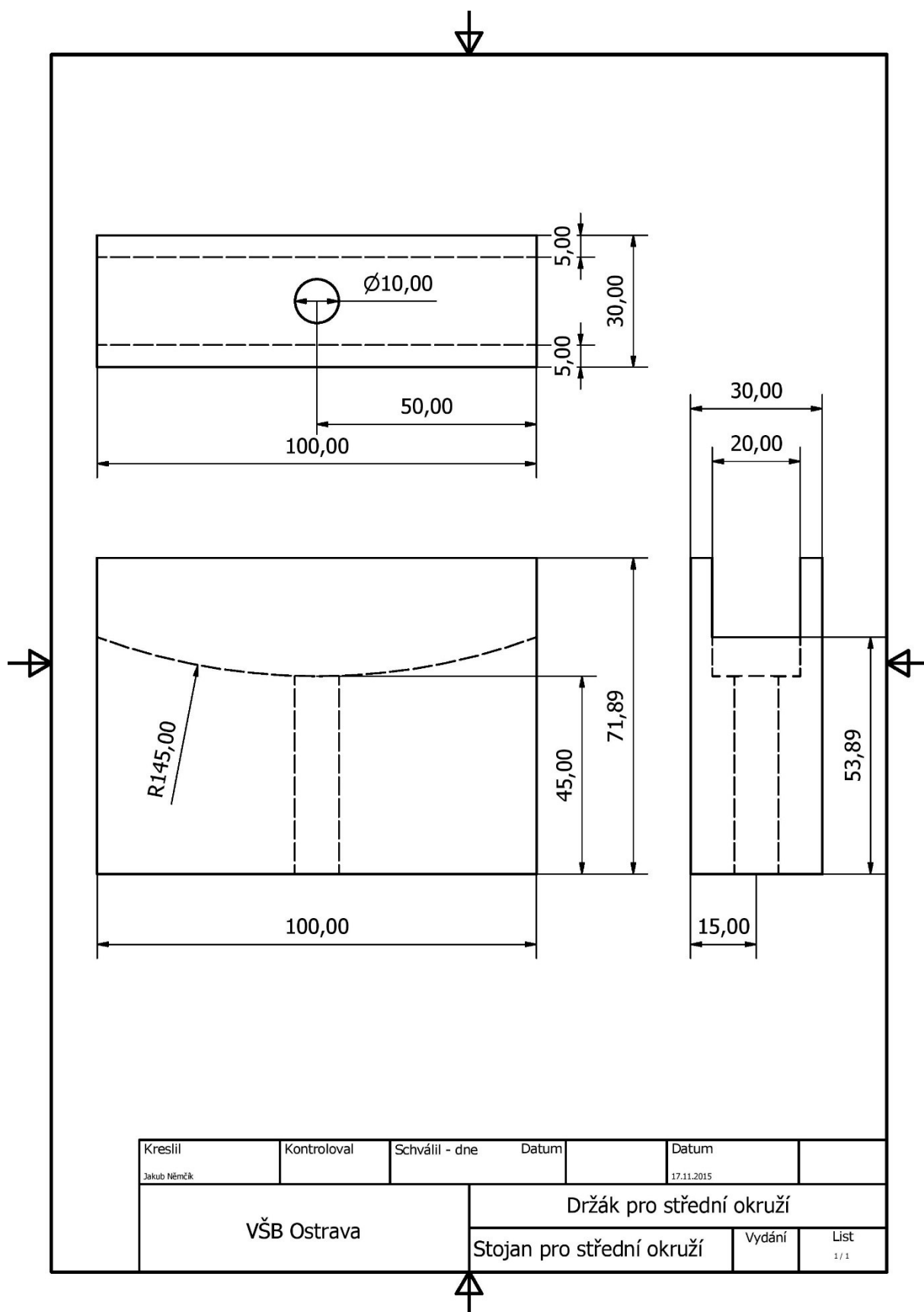
Příloha 1. d: Rozložení cívek



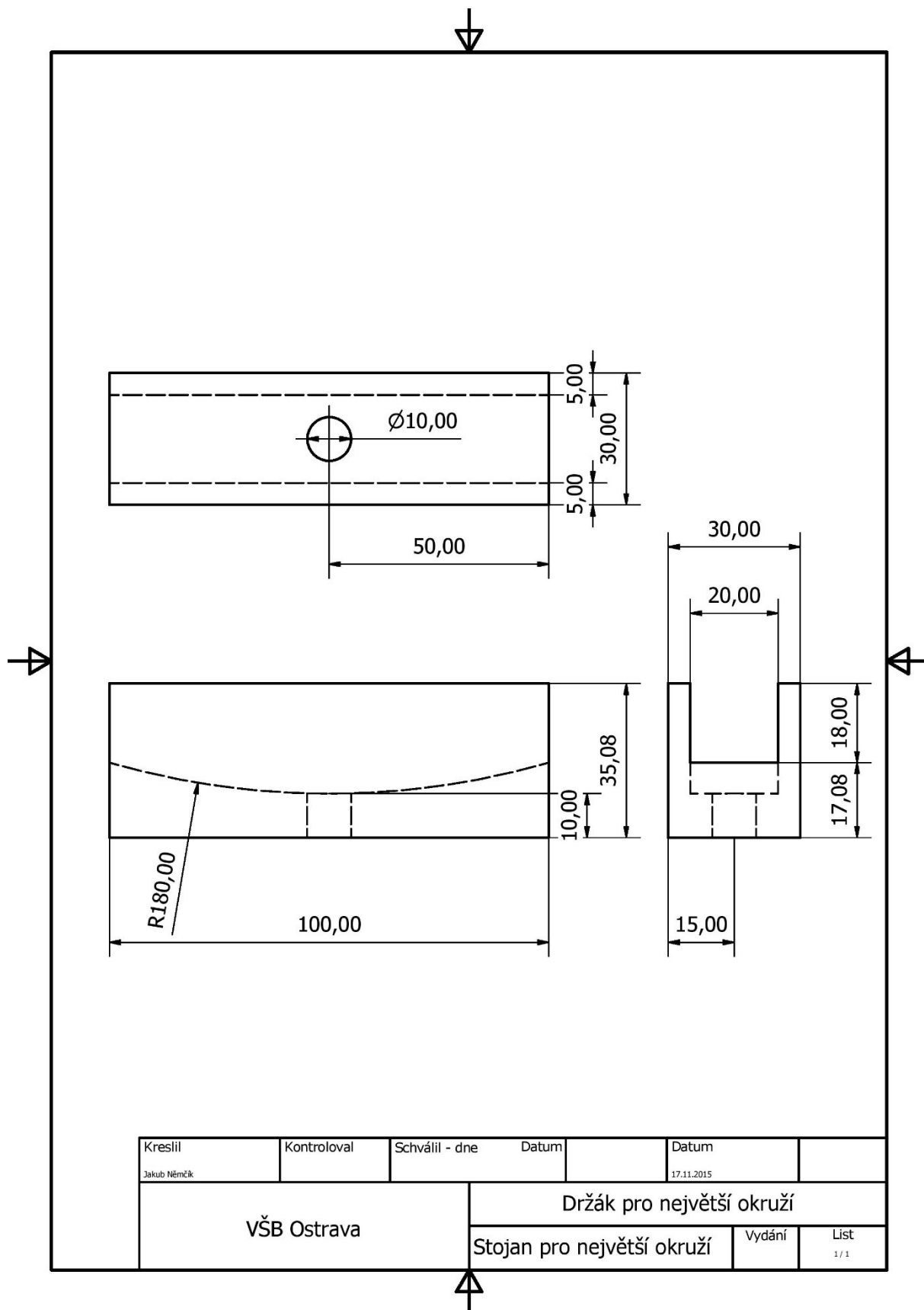
Příloha 1. e: Výkres pro frézování jednotlivých okruží



Příloha 1. f: Výkres pro stojan na nejmenší okruž

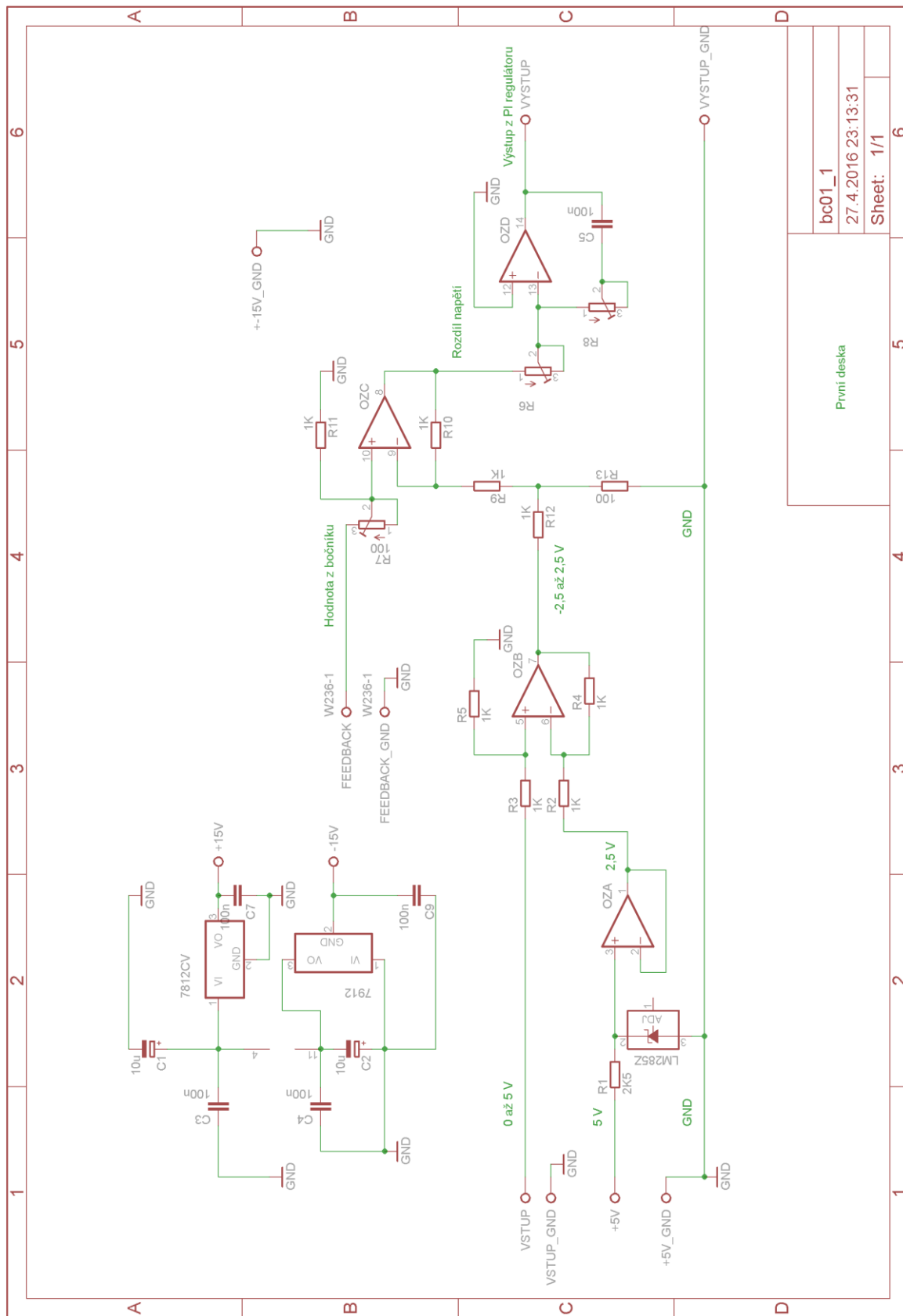


Příloha 1. g: Výkres pro stojan na střední okružní



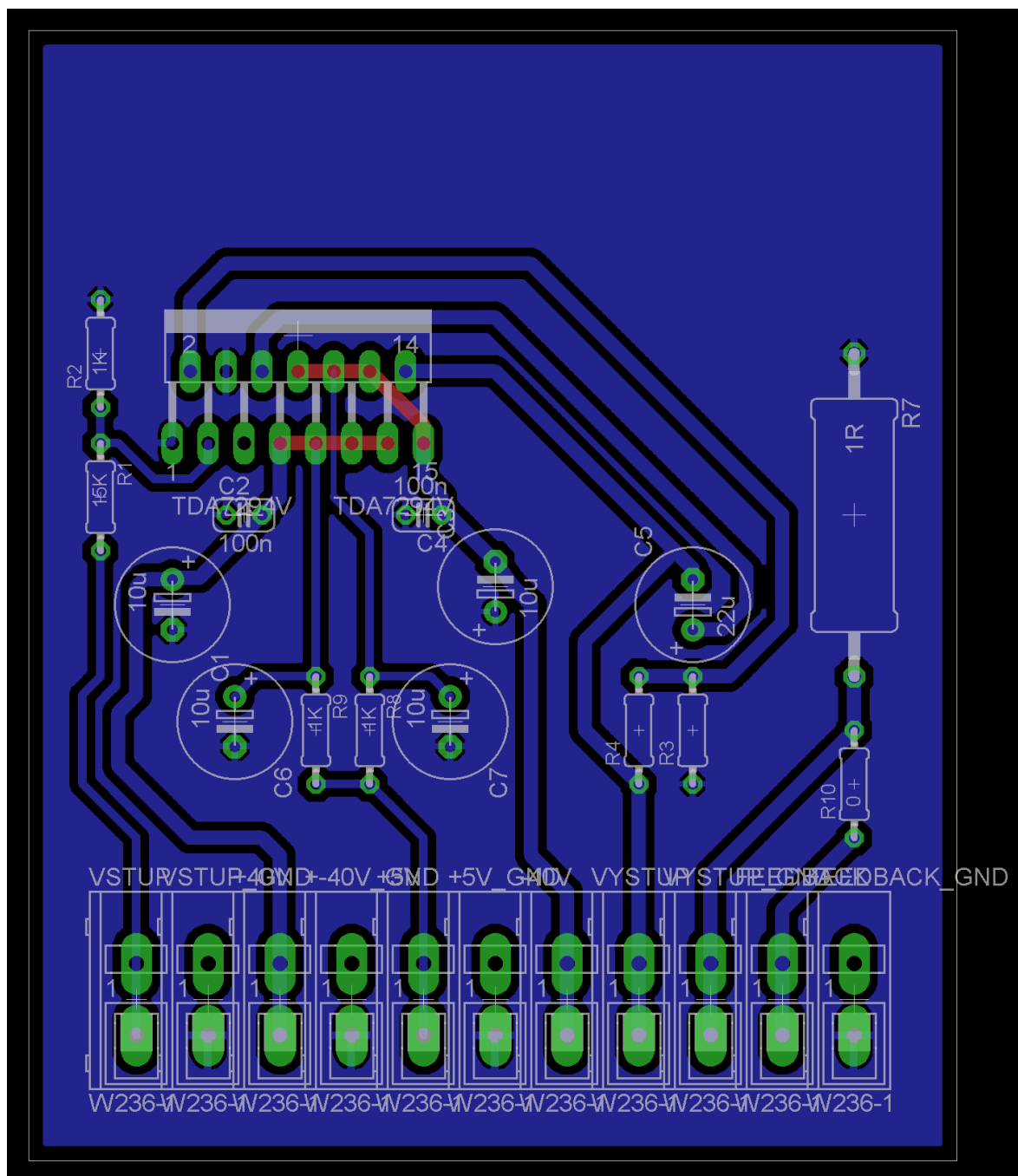
Příloha 1.h: Výkres pro stojan na největší okruží

PŘÍLOHA 2 : SCHÉMATA ŘÍDÍCÍ ČÁSTI

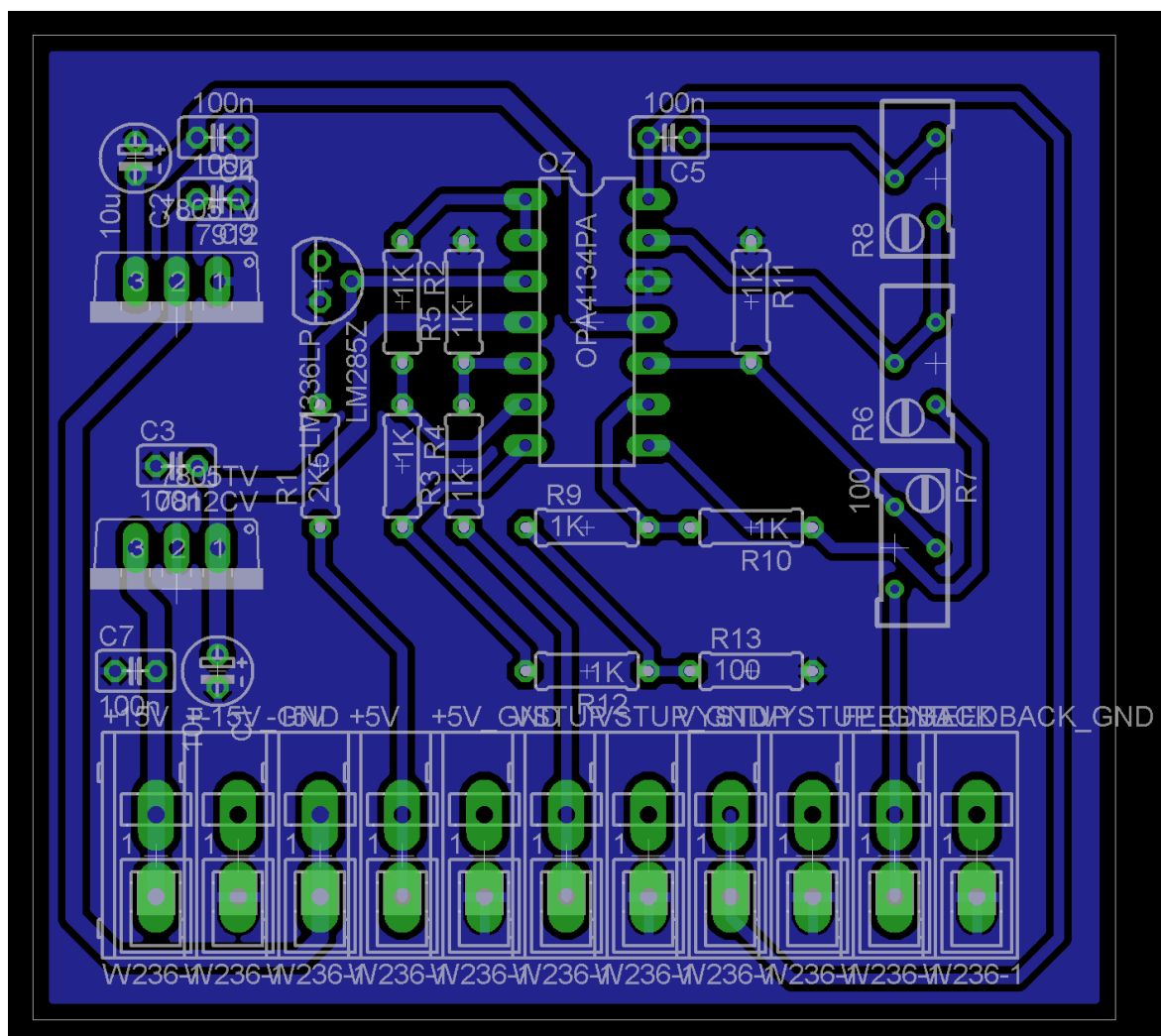


Příloha 2. a: Schéma pro první DPS

PŘÍLOHA 3: SCHÉMATA DPS



Příloha 3. a – DPS koncového zesilovače



PŘÍLOHA 4 – PŘÍLOHY NA CD

Obsah přiloženého CD:

- Soubory návrh kostry zařízení (*.ipt, *.aim)
- Výkresy jednotlivých částí (*.dwg)
- Důležité výpočty a grafy
- Postsript pro tvorbu DPS
- Schémata a výkresy DPS v programu eagle v adresáři *schémata*